

Федеральное агентство по образованию
Уральский государственный технический университет – УПИ
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина

Б. Е. Хайкин, Л. М. Железняк

ПРОФИЛЬНАЯ ПРОКАТКА

Учебное пособие

*Печатается по решению редакционно-издательского
совета УГТУ-УПИ от 28.02.2008г.*

Екатеринбург
УГТУ-УПИ 2008

УДК 621.771.26(075.8)

ББК 34.621873

X15

Рецензенты:

кафедра мехатроники Уральского государственного университета путей сообщения (зав.кафедрой, проф., д-р техн. наук Б. М. Готлиб);
ведущий научный сотрудник Института физики металлов УрОРАН, канд. техн. наук Б. И. Каменецкий

Хайкин Б. Е.

X15 Профильная прокатка : учеб. пособие / Хайкин Б. Е., Железняк Л. М.

Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2008. 86 с.

ISBN 978-5-321-01434-9

Рассмотрены основные вопросы технологии прокатки профилей: вводная информация о профильной прокатке, геометрические особенности калибров и валков, типовые схемы прокатки простых профилей, основные сведения о калибровке прокатных валков, особенности прокатки меди и низко-легированных медных сплавов, принципы выбора режима профильной прокатки.

Учебное пособие предназначено для студентов очно-заочной и заочной форм обучения специальности 110600 – Обработка металлов давлением.

УДК 621.771.26(075.8)

ББК 34.621873

ISBN 978-5-321-01434-9

© УГТУ-УПИ, 2008

© Хайкин Б. Е.,

Железняк Л. М., 2008

1. ВВОДНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОФИЛЬНОЙ ПРОКАТКЕ

1.1. Характерные особенности профильной прокатки по сравнению с прокаткой плоской

В первом приближении профильную прокатку можно определить как прокатку в ручьевых (калиброванных) валках. Ручьевой валок имеет на бочке кольцевые проточки – *ручьи*. Оппозитные (находящиеся друг против друга) ручьи верхнего и нижнего валков в сборе сочетаются в *калибры*.

Таким образом, калибр – это просвет (скважина) между оппозитными валками в сборе, образуемый противоположащими ручьями.

Просвет – это пустота, т. е. «вещь, которой нет». Определить же вещь, которой нет, строгим образом вряд ли возможно; поэтому приведенное выше определение понятия «калибр», конечно же, несовершенно и позже будет уточнено. Пока что примем это определение в качестве рабочего. Попутно отметим, что при плоской прокатке просвет между бочками рабочих валков иногда тоже называют калибром (такой калибр имеет вид прямоугольной щели).

В качестве примера (см. рис. 1.1) рассмотрим, каким образом из заготовки с круглым поперечным сечением можно получить раскат круглого поперечного сечения с меньшим, чем у заготовки, диаметром.

Круглую заготовку («круглый профиль», коротко – «круг») прокатывают в овальном калибре («овале»), который спроектирован с учетом уширения металла, т. е. ширина овального калибра больше ширины заготовки. В результате *прохода* заготовки через овальный калибр получается раскат с овальным поперечным сечением («овальный профиль», «овал»). Этот раскат *кантуют* (поворачивают) на 90° относительно продольной оси и прокатывают в круглом калибре («круге»), который спроектирован с учетом уширения, т.е. ширина круглого калибра больше ширины задаваемого в него раската. В результате *прохода* через круглый калибр получают раскат с круглым поперечным сечением («круглый профиль», «круг»).

Рассмотренный пример показывает, что в процессе профильной прокатки изменяются не только размеры, но и форма (профиль) поперечного сечения раската. Для преобразования профиля надо дать металлу значительное обжатие. Следовательно, требуется высокая пластичность металла, и поэтому профильную прокатку проводят обычно *вгорячую*. Нужный профиль раскату придается путем использования калибров определенных размеров и форм. В процессе профильной прокатки приходится кантовать раскат относительно его продольной оси. Наконец, с точки зрения технолога, важной особенностью профильной прокатки является необходимость корректного учета уширения металла при проектировании калибров.

Последнее обстоятельство связано с тем, что для получения в калибре заданного профиля требуется обеспечить определенную *степень заполнения*

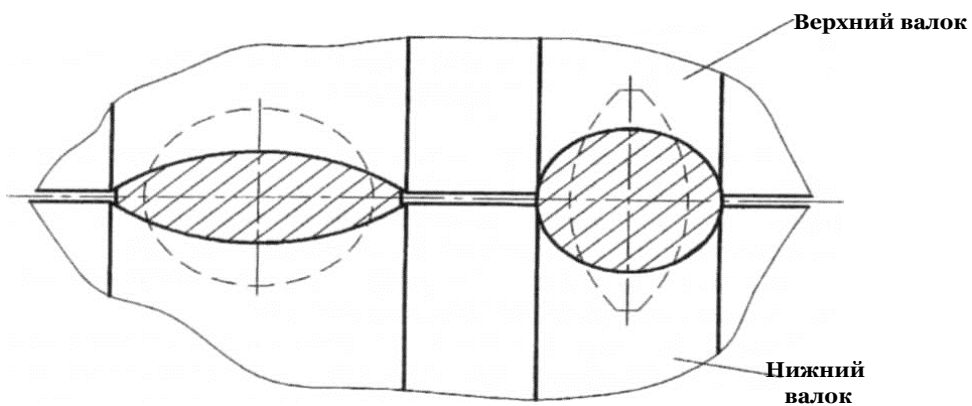


Рис.1.1

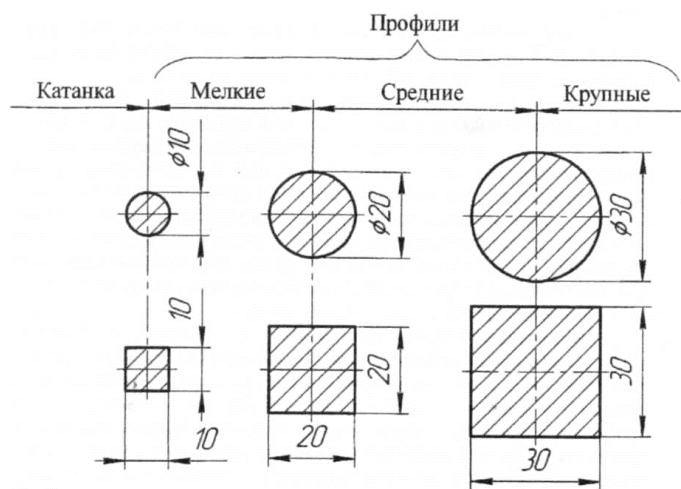


Рис. 1.2

калибра. Под степенью заполнения δ понимают отношение ширины выходящей из калибра полосы (конечной ширины полосы) к ширине калибра. Если δ существенно ниже единицы (велико незаполнение калибра), то профиль получаемой полосы существенно отличается от профиля калибра, что не всегда допустимо. Если $\delta > 1$, то имеет место переполнение калибра, что обычно нежелательно, а иногда и опасно.

Именно последнее обстоятельство создавало трудности при освоении процессов профильной прокатки. Идея применения калиброванных валков возникла давно, но и при ее реализации возникла проблема неумения проектировать калибры, поэтому профильная прокатка вошла в практику много позже плоской. Если плоская прокатка используется уже 500 лет, то профильная – около 250 (активно – с 1780 г.). Специалисты по проектированию калибров (калибровщики) ранее высоко ценились. Они тщательно хранили секреты своего мастерства, в частности, шаблоны, по которым растачивались ручки калибров. Профильная прокатка была сложным делом, и поскольку получение профилей обходилось сначала дороже, чем прокатка листов, то привилось название «сортовой (т. е. дорогой) прокат» и соответственно «сортовая прокатка». Такие названия сегодня общеприняты на заводах, где получают профили из стали. На многих заводах цветметобработки сортовую прокатку называют профильной. В данном пособии используются оба названия как эквивалентные.

Перечислим характерные особенности профильной прокатки, отличающие ее от плоской прокатки. Профильная прокатка осуществляется обычно *вгорячую* с изменением не только размеров, но и формы (профиля) поперечного сечения раската в надлежащем образом подобранных калибрах прокатных валков с применением кантовок раската между отдельными проходами. Для того чтобы правильно спроектировать калибры, надо корректно учитывать уширение металла.

1.2. Классификация профильного проката по конфигурации и назначению

В зависимости от их конфигурации принято различать *простые* и *сложные* профили.

К простым относятся *заготовки* и *профили общего назначения*, а именно:

- блюмы (крупные квадраты с большими радиусами закругления вершин) со стороной 140...450 мм;
- слябы (крупные прямоугольники) шириной 300...2000 мм и толщиной 100...250 мм;
- заготовки квадратные со стороной 40...250 мм;
- заготовки круглые диаметром 30...350 мм;
- прокат круглый диаметром 5...250 мм;
- прокат квадратный со стороной 6...200 мм;
- прокат шестигранный с диаметром вписанного круга 6...75 мм;

- полосы (прямоугольники) шириной 16...200 мм и толщиной 4...60 мм соответственно.

Сложные профили – это, во-первых, фасонные профили общего назначения (уголки равнополочные и неравнополочные, швеллеры, балки двутавровые, а также двутавры с параллельными гранями полок) и, во-вторых, фасонные профили отраслевого назначения (рельсы разнообразных типов, про-фили для рельсовых креплений, для вагоностроения, тракторостроения, сельскохозяйственных машин, автомобильной промышленности, угольного, горного, химического, нефтяного машиностроения, для строительства гидротехнических сооружений, для строительного, дорожного и коммунального машиностроения, для электротехнической промышленности, для судостроения и др.).

Кроме того, существует обширная группа профилей специального назначения, большинство из которых является профилями фасонными, но некоторые могут быть отнесены к простым (например, ромбические, пустотелые круглые и шестигранные).

1.3. Классификация профильного проката по размерам профилей

Эта классификация дана ниже.

Группа профилей	Площадь поперечного сечения, мм ²
Катанка (заготовка для волочения проволоки)...	Меньше 100
Мелкие профили.....	От 100 до 300...400
Средние.....	От 300...400 до 700...900
Крупные.....	Больше 700...900

Классификацию легко запомнить, если использовать рис. 1.2.

1.4. Уточненное определение понятия «калибр»

В п. 1.1 было отмечено, что один из характерных признаков профильной прокатки – применение ручьевых (калиброванных) валков. Соответственно этому калибр был определен как просвет между валками, образованный оппозитными ручьями валков в сборе. Однако такое определение не является полным, т. к. профильный прокат можно получать не только в профильных валках. Поэтому лучше дать более широкое понятие калибра.

Определение калибра как части пространства. Калибр – это рабочая часть межвалкового промежутка (просвета между валками), т. е. та часть, в пределах которой осуществляется формоизменение металла при проходе полосы между валками.

В технологических рассуждениях понятие «калибр» часто используется в узком смысле слова, чему соответствует *определение калибра как части плоскости*: калибр – это рабочая часть просвета (промежутка) между валка-

ми в плоскости осей в сборе, т. е. *в плоскости выхода полосы из валков*. Как правило, используется частное определение понятия «калибр».

Уточненное определение позволяет выделить следующие типы калибров.

1. Безручевой калибр, образованный участками гладких бочек, конкретно – плоский калибр.

2. Ручевой калибр, образованный противолежащими ручьями оппозитных валков, например овальный калибр.

3. Калибр, образованный противолежащими выступами оппозитных валков, например разрезной (разгонный) калибр (см. рис. 1.3).

4. Комбинированный калибр (комбинация типа «ручей + гладкая бочка» или «ручей + выступ»), например треугольный калибр (см. рис. 1.4, а) для прокатки заготовок трехгранных напильников или калибр для прокатки углового профиля (рис. 1.4, б).

Ручьевые калибры иногда называют открытыми – разъемы между валками, образующими калибр, находятся в пределах его высоты (пример на рис. 1.5, а); комбинированные калибры в варианте «ручей + выступ» обычно являются закрытыми, т. е. разъемы между валками, образующими калибр, находятся выше или, наоборот, ниже самого калибра (пример на рис. 1.5, б). Комбинированные калибры могут быть также открытыми (рис. 1.4, а, б).

1.5. Основные калибры для прокатки простых профилей

В цветметобработке и на заводах качественных сталей получают прокаткой в основном простые профили. При этом используют разнообразные калибры, например:

- плоский калибр (образован гладкими бочками рабочих валков, см. рис. 1.6, а),
- ящичный (рис. 1.6, б);
- калибры системы «ромб – квадрат» (рис. 1.6, в);
- «овал – квадрат» (рис. 1.6, г);
- «овал – круг» (рис. 1.6, д).

1.6. Классификация калибров по их роли в формировании конечного (товарного) профиля

Последний по ходу прокатки калибр, из которого выходит конечный (готовый) профиль, называют *чистовым*. Соответственно этому конечный профиль также называют чистовым.

Естественно, что конфигурация и размеры чистового калибра должны соответствовать конфигурации и размерам чистового профиля. Если, например, требуется получить шестигранный конечный профиль, то чистовой калибр должен быть шестигранным. Возможные варианты представлены на рис. 1.7.

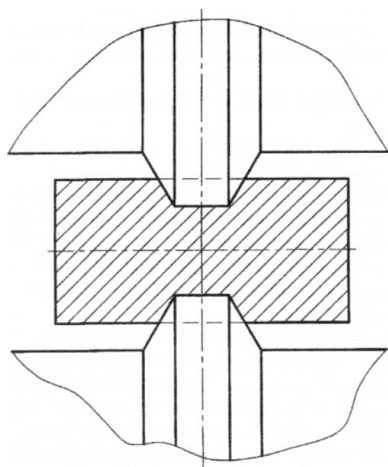


Рис. 1.3

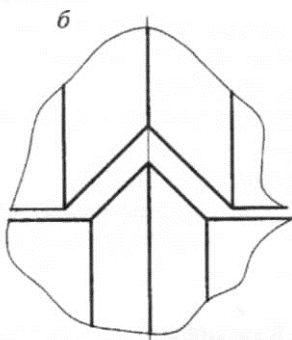
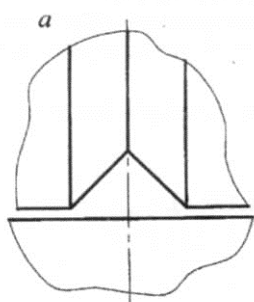


Рис. 1.4

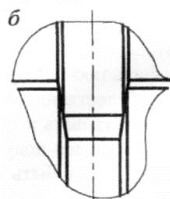
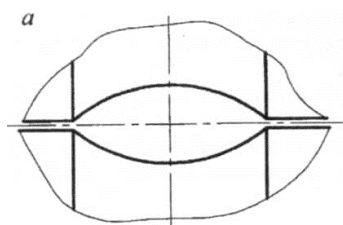


Рис. 1.5

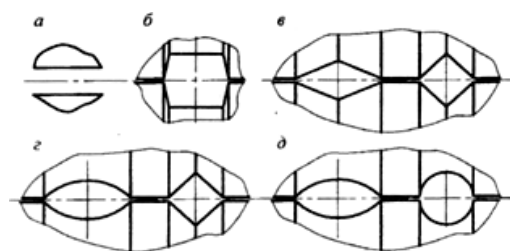


Рис. 1.6

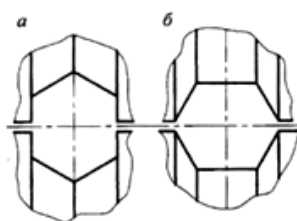


Рис. 1.7

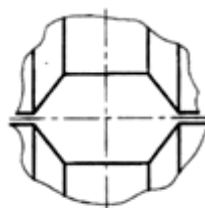


Рис. 1.8

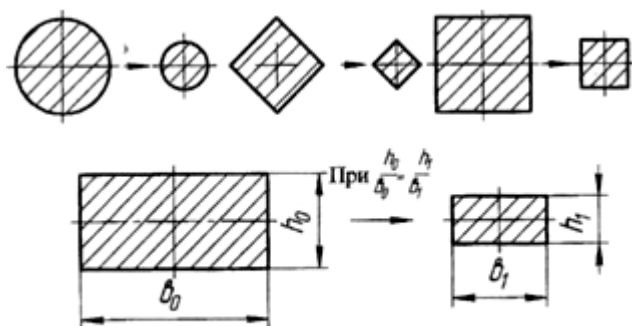


Рис. 1.9

Калибр, который предшествует чистовому, называется *предчистовым*. Его задача – сформировать такой предчистовой профиль, из которого в чистовом калибре можно было бы получить аккуратный конечный. Если, например, требуется прокатать хорошо оформленный шестигранный профиль, то целесообразно использовать следующую пару калибров: чистовой калибр – по варианту на рис. 1.7, а, предчистовой – шестиугольный (см. рис. 1.8); при этом предчистовой профиль задается в чистовой калибр «на ребро», т. е. после кантовки на 90° относительно продольной оси.

Предчистовому калибру предшествуют *подготовительные*. Их задача – подготовить формирование аккуратного чистового профиля: сформировать этот профиль вчерне (последнее требуется при прокатке сложных, т. е. фасонных профилей). Подготовительные калибры часто называют *черновыми*.

При прокатке простых профилей формирование аккуратного конечного профиля обычно обеспечивается надлежащим выбором пары последних калибров (предчистовой + чистовой). Задача предшествующих им калибров сводится к интенсивной вытяжке раската, поэтому такие предшествующие калибры называют *вытяжными*.

Первые по ходу прокатки калибры принято называть *обжимными*. Четкой границы между понятиями «обжимной калибр» и «вытяжной калибр» нет; считают, что обжимные калибры – это те, которые размещены на валках первой по ходу прокатки (обжимной) клетки.

1.7. Морфологический анализ вариантов прокатки простых профилей

Выше уже было отмечено, что характерная особенность профильной прокатки – изменение от прохода к проходу не только размеров, но и формы (профиля) поперечного сечения полосы. При рассмотрении вопросов трансформации (преобразования) профиля полезно обратить внимание на понятие морфологии (науки о формах).

Простейшее морфологическое преобразование является *изоморфным* (приставка «изо» означает «тождество», так что изоморфизм – сохранение формы). Схемы изоморфных преобразований даны на рис. 1.9.

Изоморфные преобразования в процессах обработки металлов давлением (ОМД) реализуются, например, при прессовании круглого прутка из круглого слитка, а также при волочении круглой проволоки из круглой катанки. Простота связана с полезностью, и поэтому изоморфизм преобразования профиля – идеал, к которому желательно стремиться во всех процессах ОМД.

При профильной прокатке изоморфизм в каждом отдельном проходе, очевидно, невозможен. Однако его можно обеспечить за пару проходов. Примерами являются следующие схемы, построенные в предположении, что уширение отсутствует (рис. 1.10). Условные обозначения на этих схемах: НО – направление обжатия, $K90^\circ$ – кантовка на 90° .

У всех указанных на рис. 1.10 схем есть общая особенность: и в первом, и во втором проходах, взятых в отдельности, реализуется гомоморфное преобразование («гомо» означает «однородность», «близкое сходство») – обеспечивается гомоморфизм¹, т. е. подобие профилей до и после каждого прохода. Такое преобразование может быть названо однородным (пропорциональным). Однородность преобразования профиля означает однородность деформации со всеми вытекающими отсюда полезными следствиями (например минимум дополнительных внутренних напряжений, наводимых в металле в процессе прокатки).

Если нельзя обеспечить изоморфизм преобразования профиля за два прохода из-за каких-либо ограничений на процесс прокатки, имеет смысл реализовать его за три-четыре прохода, например, по схеме на рис. 1.11.

К сожалению, однородными преобразованиями невозможно обойтись даже при прокатке простых профилей, т. к. далеко не всегда профиль исходной заготовки изоморфен чистовому. Например, на проволочных станах заводов черной металлургии круглую катанку получают из заготовки квадратного сечения. При трансформации же квадрата в круг неизбежны переходы с существенно негомоморфным (непропорциональным, неоднородным) преобразованием. Простейшее преобразование квадрата в круг обеспечивает схема «квадрат – эллипс – круг» (реализуется на производстве в варианте квадрат – овал – круг). Если исходная заготовка круглая, а требуется получить квадрат, то становится целесообразной схема «круг – эллипс – квадрат» (реализуется на производстве в варианте круг – овал – квадрат) и схема «круг – ромб – квадрат». Вынужденные отступления от гомоморфизма компенсируются рядом преимуществ, обсуждаемых в следующем разделе.

Рассмотренные в п. 1.7 схемы однородных преобразований идеализированы: фактически неравномерное по высоте очага деформации уширение металла порождает нарушение гомоморфизма (однородности преобразований). Желательно выбирать схемы прокатки так, чтобы нарушения гомоморфизма были минимальными; если же допускается грубое нарушение, то оно должно перекрываться компенсирующими урон преимуществами.

Иногда целесообразно «смягчить» нарушение гомоморфизма. Примеры «смягченных» схем даны на рис. 1.12: схема «квадрат – незаполненный эллипс – круг» (см. рис. 1.12, *а*), схема «круг – ромб» с ярко выраженными закруглениями вершин – квадрат с закруглениями (см. рис. 1.12, *б*).

¹ Существуют следующие определения: «изоморфизм – соответствие между объектами, выражающее тождество их структуры (строения)»; «гомоморфизм – понятие, обобщающее понятие изоморфизма. Гомоморфизм – такое соответствие между объектами двух множеств, при котором одно множество есть «модель» другого».

Круг - эллипс - Квадрат - ромб - Квадрат - прямоугольник -

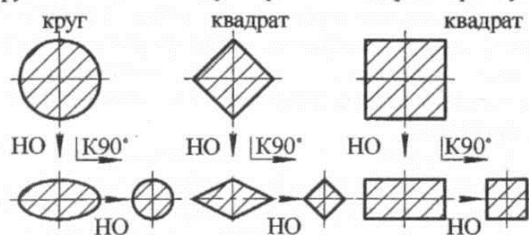


Рис. 1.10

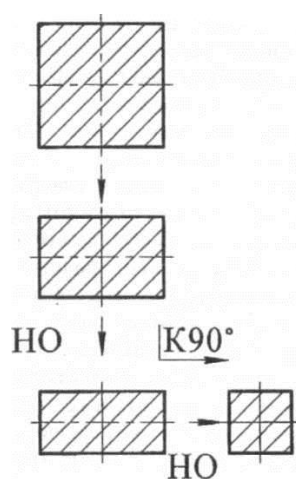


Рис. 1.11

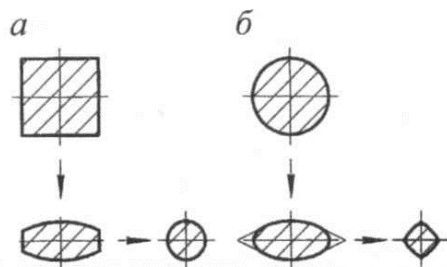


Рис. 1.12

1.8. Начальные сведения о вытяжной способности простых калибров: сопоставительный анализ идеализированных схем

Определим максимальные коэффициенты вытяжки применительно к идеализированным (без уширения) схемам прокатки различных профилей при прочих равных условиях. Под «прочими равными условиями» будем понимать равенство габаритных размеров разных калибров и равенство габаритных размеров начальных профилей. Будем считать, что ширина исходного профиля равна ширине калибра. Ограничимся рассмотрением четвертой части очага деформации.

Первая совокупность схем прокатки представлена на рис. 1.13:

- а) прямоугольник – квадрат (в ящичном калибре без уклонов);
- б) ромб – квадрат; в) эллипс – квадрат; г) эллипс – круг.

Вторая совокупность схем прокатки представлена на рис. 1.14:

- а) квадрат – прямоугольник (в ящичном калибре без уклона стенок);
- б) квадрат – ромб; в) квадрат – эллипс; г) круг – эллипс.

Из рис. 1.13, 1.14 видно: если бы прокатка осуществлялась в идеализированных условиях, то вытяжная способность была бы одинаковой у всех рассмотренных схем, кроме схемы «эллипс – квадрат» и «квадрат – эллипс», которые существенно выделяются из общего ряда в лучшую сторону (последнее можно считать компенсацией за нарушение гомоморфизма преобразования профиля).

Уширение металла требует, чтобы ширина калибра была меньше начальной ширины профиля, и при прочих равных условиях это снижает вытяжку за проход. Вытяжная способность калибров оказывается ниже также из-за ряда технических ограничений на режимы обжатий. Однако рассмотрение результатов идеализированных схем даёт полезные ориентиры. В частности, полезен вывод о потенциальных возможностях получения повышенных вытяжек в калибрах системы «эллипс – квадрат» («овал – квадрат»).

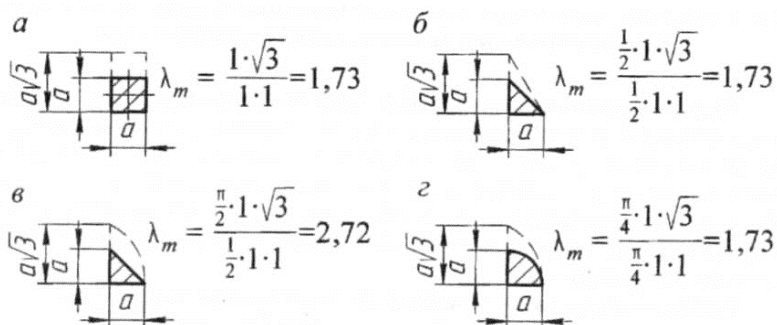


Рис. 1.13

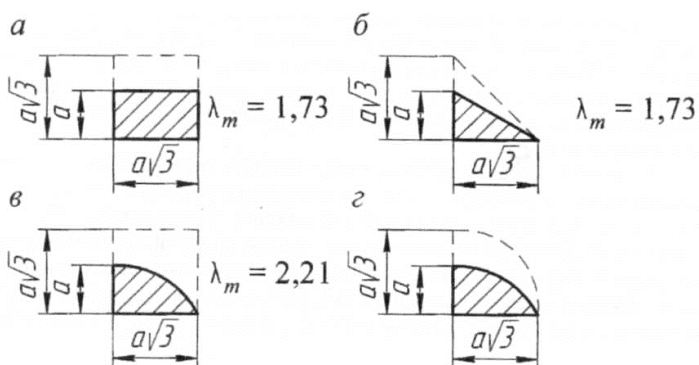


Рис. 1.14

2. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РУЧЬЕВЫХ КАЛИБРОВ И ВАЛКОВ

2.1. Основные размеры, характеризующие ручьевого калибр и его положение в валках

Понятия, вынесенные в заголовок п. 2.1, рассмотрим на примере прямоугольного (ящичного) калибра (см. рис. 2.1).

Принятые обозначения таковы: H – высота калибра (по врезу);

H – глубина вреза (высота) ручья (может быть различной для верхнего и нижнего валков);

S – зазор между валками;

B – ширина калибра по врезу;

b – ширина калибра по дну;

A – межцентровое расстояние валков;

D_d – диаметр валка по дну калибра или, что то же самое, диаметр по врезу (может быть различным у верхнего и нижнего валков);

D_b – диаметр бочки валка или, что то же самое, диаметр по бурту (может быть различным у верхнего и нижнего валков);

r' – радиус закругления в углах калибра;

r'' – радиус закругления у зазора (радиус перехода от стенки калибра к бурту).

Размер b определяется в предположении, что $r' = 0$, размер B – в предположении, что $r'' = 0$. Можно сказать, что размеры b и B определяются по «скелету» калибра, под которым понимается контур калибра, вычерченный в предположении, что $r' = r'' = 0$.

2.2. Врезы ручьев простых калибров

При проектировании калибров для прокатки простых профилей стремятся обойтись калибрами, симметричными по высоте, т. е. такими, у которых верхний и нижний ручьи одинаковы. Это может быть легко достигнуто в условиях клетки дуо.

Иначе обстоит дело в условиях клетки трио – нереверсивной клетки, прокатка в которой идет попеременно то в верхнем, то в нижнем «горизонтах». Чтобы разместить на валках такой клетки как можно больше калибров, их делают *сопряженными*: калибры верхнего и нижнего горизонтов сопрягаются за счет того, что в состав каждого из них входит один и тот же ручей среднего валка. Поскольку высота верхнего и нижнего калибров должна быть различной, то соответственно высота ручьев в верхнем и нижнем валках неодинакова и каждый из калибров асимметричен по высоте.

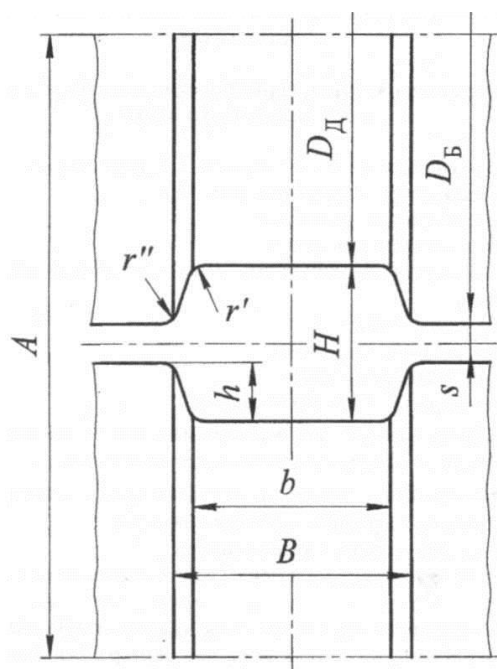


Рис. 2.1

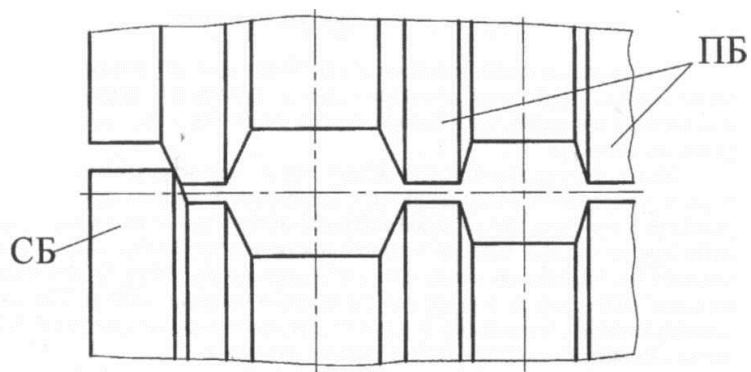


Рис. 2.2

2.3. Зазор между валками

Высота калибра складывается из глубины врезов в верхний и нижний валки и величины зазора S между ними (см. рис. 2.1). При проходе полосы между валками усилие, действующее со стороны металла на валки, стремится раздвинуть их, вследствие чего зазор увеличивается. Такое явление называют *отдачей (пружиной)* валков. Величина отдачи складывается из упругих деформаций деталей рабочей клетки: прогиба и сплющивания валков, сжатия вкладышей (подшипников), подушек, нажимных винтов и гаек, изгиба и растяжения станин. Свой вклад в отдачу вносят неплотности (люфты) между де-талями рабочей клетки.

Если бы не было зазора (валки были бы «посажены» друг на друга), то валки сильно изнашивались бы на холостом ходу, они ударялись бы друг о друга после выхода полосы (удар из-за «обратной» отдачи клетки после снятия нагрузки) и было бы невозможно свести валки (настроить их) при незаполнении калибра, которое может иметь место из-за чрезмерной отдачи валков или износа калибра.

В зависимости от конструкции клетки и усилий прокатки величина S изменяется от долей миллиметра на проволочных станах до 5...10 мм на блюмингах и других обжимных станах. Конкретно зазор между валками принимается для обжимных станков равным 1...1,5 %, для других станков – 0,5... 1 % от диаметра валков.

Поскольку чертеж калибра показывает его форму и размеры в момент прохода полосы, то зазор между валками на холостом ходу клетки устанавливается меньше указанного на чертеже зазора на величину отдачи.

Место, где контур калибра пересекается с линией зазора, называется *разъемом* калибра. Уже отмечалось, что если разъем находится в пределах высоты калибра, то калибр называется открытым; если разъем вне высоты калибра, то калибр называется закрытым.

2.4. Бурты (реборды)

Бурт – это выступ на валке между двумя соседними ручьями. Буртами называют также выступы по краям бочки. Бурты отделяют ручьи друг от друга и от краев бочки. Ради экономии длины бочки бурты должны иметь минимально возможную ширину, которая предопределяется условиями прочности бурта (бурт делается тем шире, чем больше его высота и уже основание). При выборе ширины буртов учитывается также необходимость размещения при валках поводковой арматуры.

Различают две разновидности буртов: *плоские* (при открытых калибрах) и *ступенчатые* (при закрытых калибрах). Иногда ступенчатые бурты делают по краям бочки для фиксации валков относительно друг друга (см. рис. 2.2). Недостаток ступенчатых буртов – износ в месте соприкосновения друг с другом.

2.5. Выпуски (уклоны) калибра

Боковые стенки калибра имеют некоторый наклон к оси валков. Этот наклон называют *выпуском*. Выпуски обеспечивают:

- свободный выход (выпуск) полосы из калибра, поскольку при выполнении стенок каждого ручья перпендикулярно оси валка имело бы место сильное защемление полосы из-за уширения металла и возникала бы опасность окова валков;
- правильную подачу полосы в калибр. Наклонные стенки калибра образуют сужающуюся щель, что способствует центрированию полосы при задаче ее в калибр;
- возможность предотвратить образование лампасов (заусенцев) на полосе. Выпуски создают простор для уширения, что подстраховывает от чрезмерного переполнения калибра;
- возможность предотвратить ремонт валков (перетачивать их) с сохранением размеров калибра по ширине (см. рис. 2.3, *a*); для сравнения на рис. 2.3, *б* показано, что при отсутствии выпусков при переточке ширина калибра увеличивается, штриховыми линиями показан контур калибра после переточки валков.

Величина выпуска калибра (см. рис. 2.4) характеризуется уклоном Δ/h (обычно уклон указывают в процентах как $(\Delta/h) \cdot 100\%$ или углом (φ в градусах). У ящичных калибров выпуск может составлять 1...10 % и больше (он тем значительнее, чем крупнее сечение прокатываемой полосы). Для ящичных калибров, используемых на блюминге, он равен 10...25 %. Чем больше выпуск, тем больше допускаемый съём по диаметру для восстановления первоначальных размеров калибра, тем больше срок службы валков.

2.6. Закругления в калибрах

В технике избегают острых углов, т. к. они – концентраторы напряжений. Внутренние углы калибра закругляют ещё и потому, что в противном случае у раската были бы чрезмерно выраженные острые ребра, которые быстро остывали бы. Закругления при переходе от контура калибра к буртам позволяют избежать дефектов поверхности раската (подрезов) при неаккуратной задаче полосы в валки. Если калибр переполняется, то благодаря закруглениям в местах разъема калибра на полосе получается округлый заусенец, который не порождает дефектов («закатов») при последующей прокатке.

Радиусы закруглений назначают в зависимости от глубины ручья h . Конкретно в углах калибра $r' = (0,22...0,25)h$, радиус закругления у зазора составляет $r'' = (0,18...0,25)h$.

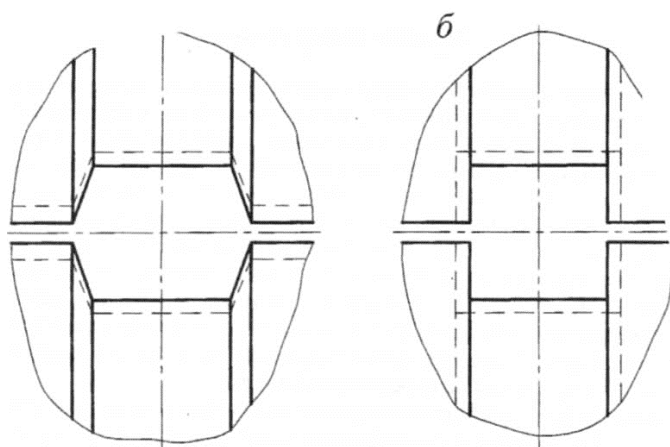


Рис. 2.3

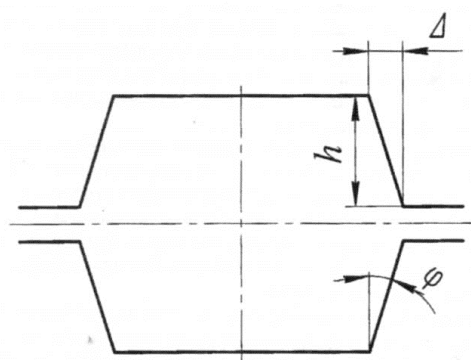


Рис. 2.4

2.7. «Давление» валков

В реальном процессе прокатки действуют многочисленные неконтролируемые факторы, порождающие разницу условий на контактах полосы с верхним и нижним валками (например неодинаковое трение из-за того, что с нижней поверхности полосы при движении ее по рольгангу более интенсивно осыпается окалина). Если даже процесс прокатки замыслен как симметричный (одинаковые диаметры валков, одинаковые угловые скорости валков, одинаковые врезы калибра в верхний и нижний валки и т.д.), фактически он не будет таковым. Под воздействием случайных факторов будут возникать тенденции к изгибу полосы в сторону одного из валков при ее выходе из калибра. Непредсказуемое поведение нежелательно, и поэтому технологи вводят в процесс преднамеренную асимметрию, порождающую тенденцию к небольшому изгибу полосы на определенный валок.

Простейший способ преднамеренного создания тенденции к изгибу состоит в том, что верхний и нижний валки изготавливаются с небольшой разницей в их диаметрах. Исторически сложилось так, что разницу диаметров верхнего и нижнего валков сортовики называют «давлением» валков. Такое «давление» измеряется в миллиметрах.

На блюминге обеспечивают «нижнее давление» валков: диаметр нижнего валка делают на 10...15 мм больше. При этом полоса на выходе из валков изгибается в сторону верхнего валка, что предотвращает удары массивной полосы о ролики рольганга (такие удары неизбежны, если процесс проектируется как симметричный, и под воздействием случайных величин некоторые из полос изгибаются вниз).

На сортовых станах создают «верхнее давление» согласно следующим рекомендациям: черновые клетки – 2...4; промежуточные – 1...3; чистовые клетки – 0,5...1 мм. «Верхнее давление» порождает тенденцию к изгибу полосы на нижний валок. Это учитывается при проектировании проводковой арматуры. Поскольку наперед известно, что полоса будет прижиматься к нижней выводной проводке, то можно обойтись без верхней проводки и тем самым упростить валковую арматуру.

Прокатка с «давлением» валков имеет теневую сторону, т. к. при изгибе полосы в ней возникают дополнительные продольные напряжения (в части сечения сжимающие, а в другой – растягивающие, последние опасны). Существует ещё одно неприятное обстоятельство. Из-за наличия зазоров в муфтах и шпинделях валок меньшего диаметра при проходе полосы через очаг деформации опережает «свой» шестеренный валок и работает в качестве холостого (т. е. выступает как «тормоз» по отношению к валку большего диаметра); когда полоса выходит из клетки, меньший валок останавливается и вновь начинает вращаться после того, как будут «выбраны» указанные зазоры. В момент страгивания малого валка происходит удар, в результате чего могут возникнуть поломки в линии привода.

При прокатке фасонных профилей «давление» предопределяется тем, в какой из валков врезана закрытая часть калибра, – этому валку придают больший диаметр.

На станах с индивидуальным приводом каждого из валков обходятся без «давления» валков и тенденцию к преднамеренному небольшому изгибу создают рассогласованием их скоростей.

2.8. Расположение калибра относительно осей валков

Для того чтобы охарактеризовать расположение калибра в плоскости осей валков, рассмотрим понятия средней линии валков, нейтральной линии калибра и линии прокатки.

Средняя линия валков – это такая прямая линия, располагающаяся в плоскости осей валков, которая делит расстояние между осями пополам (см. рис. 2.5).

Для определения нейтральной линии калибра надо рассмотреть выходное сечение прокатываемой в данном калибре полосы, т. е. сечение полосы плоскостью осей валков. Нейтральная линия калибра – это прямая линия, параллельная осям валков и проходящая через центр тяжести выходного сечения полосы. Иногда считают, что нейтральная линия проходит через центр тяжести линий контакта металла и валков в выходном сечении полосы. Оба указанных определения нейтральной линии дают приближенные количественные оценки положения линии, имеющей следующий физический смысл: это параллельная осям валков линия, разделяющая калибр по высоте на две части, воздействия валков на которые уравновешены таким образом, что если бы нейтральная линия совпадала со средней линией валков, то полоса не проявляла бы тенденции к изгибу на определенный валок.

При выборе расположения калибра относительно осей валков нейтральную линию калибра совмещают с линией прокатки (см. рис. 2.5). Линия прокатки – прямая линия в плоскости осей валков, параллельная этим осям и расположенная таким образом, чтобы было обеспечено надлежащее давление валков ΔD .

Иногда говорят, что линия прокатки – это линия соприкосновения начальных диаметров валков. Начальными диаметрами D_B^* и D_H^* (рис. 2.5) называют те диаметры, имея которые, валки без зазора соприкасались бы друг с другом по линии прокатки. Понятие начальных диаметров является важным в вопросе о давлении валков ΔD , т. к. по определению

$$\Delta D = D_B^* - D_H^*.$$

Выведем формулу для расчета расстояния x между линией прокатки и средней линией валков в том случае, когда заданы межцентровое (межосевое) расстояние A и давление валков ΔD .

Из рис. 2.5 видно, что

$$D_B^*/2 = A/2 + x, \quad D_H^*/2 = A/2 - x,$$

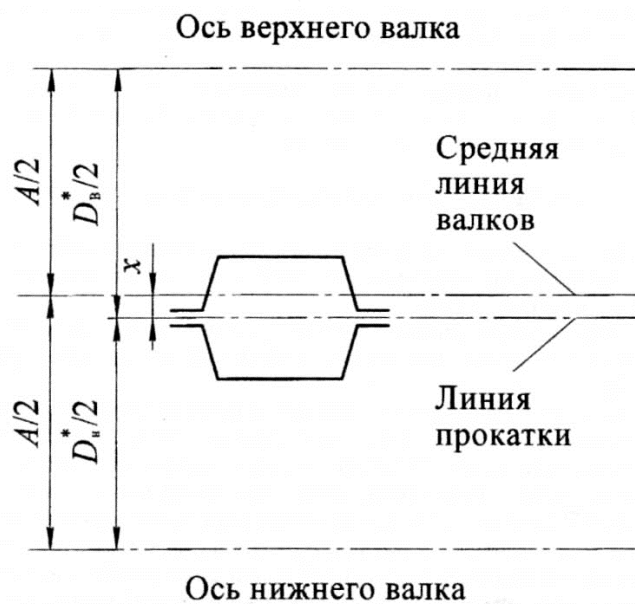


Рис. 2.5

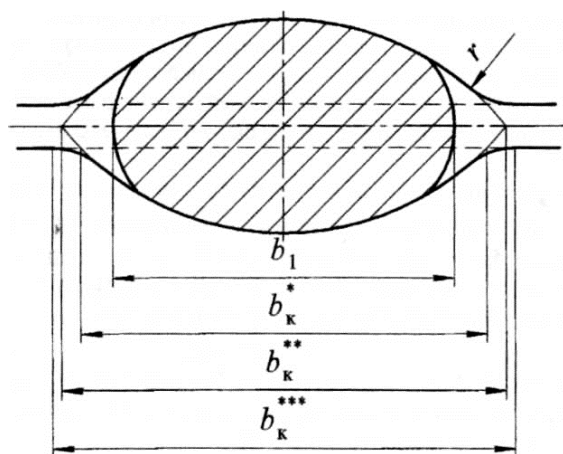


Рис. 2.6

т.е.

$$D_B^* = A + 2x, D_H^* = A - 2x.$$

Вычитая D_H^* из D_B^* , получаем выражение

$$D_B^* - D_H^* = 4x = \Delta D,$$

т. е.

$$x = \Delta D / 4.$$

Таким образом, при прокатке с верхним давлением линия прокатки располагается ниже средней линии валков на расстоянии $\Delta D/4$; при прокатке с нижним давлением она лежит выше средней линии валков на расстоянии $|\Delta D|/4$.

2.9. Вычерчивание монтажа калибров

Монтажом калибров называется совокупность калибров данного комплекта валков в сборе.

Вычерчивание отдельного калибра проводится в следующем порядке (предполагается, что известны межцентровое расстояние валков A , давление валков ΔD , высота H и прочие размеры калибра).

1. На чертеж наносят оси верхнего и нижнего валков; делением межосевого расстояния пополам определяют среднюю линию валков.
2. На расстоянии $\Delta D/4$ от этой линии наносят линию прокатки.
3. Тем или иным способом определяют нейтральную линию калибра и со-вмещают ее с линией прокатки.
4. К линии прокатки «привязывают скелет калибра», т. е. наносят на чертеж общие контуры ручьев.
5. Вводят внутренние и внешние радиусы закруглений ручьев и прочие «подробности» (например придают выпуклость дну ящичного калибра).

На чертеже монтажа калибров не показывают шейки и тrefы валков, а вычерчивают лишь бочки валков с указанием врезанных в них калибров.

2.10. Характеристики заполнения ручьевого калибра

Ситуацию рассмотрим на примере овального калибра (рис. 2.6). Получаемый в этом калибре овальный профиль покрыт штриховкой.

Уже говорилось, что степень заполнения калибра δ можно определить как отношение конечной ширины полосы b_1 к ширине калибра b_K , т. е. $\delta = b_1 / b_K$. Однако, что следует понимать под b_K ? Однозначного ответа нет, поскольку из-за наличия разъемов валков (зазора между ними) контур калибра разомкнут, кроме того, неопределенность вносится наличием закруглений при переходе от контуров ручьев к буртам валков. Ширина калибра определяется в трех вариантах: b_K^* – ширина вреза в валки по «скелету» калибра; b_K^{**} – расстояние между точками смыкания условно расположенных линий, образующих «скелеты» ручьев; b_K^{***} – ширина по врезу в валки с учетом закруглений при переходе от ручьев к буртам.

Для уточнения b_k в формуле $\delta = b_1/b_k$ учтем, что значение $\delta = 1$ должно рассматриваться как предельно допустимое: при $\delta < 1$ калибр не заполнен, при $\delta > 1$ переполнен. Очевидно, что при $b_1 = b_k^{***}$ следует говорить о переполнении калибра с затеканием металла в зазоры между валками, при $b_1 = b_k^*$ ситуация близка к предельно допустимой, но еще не опасна. Следовательно, под b_k в формуле $\delta = b_1/b_k$ целесообразно понимать некоторое среднее между b_k^* и b_k^{***} значение. Таковым логично считать величину b_k^{**} , несмотря на условность ее определения.

Возможно (и иногда используется) еще одно определение степени заполнения ручьевого калибра

$$\delta = \omega_1/\omega_k,$$

где ω_1 – конечная площадь поперечного сечения полосы; ω_k – площадь калибра, определяемая с привязкой к ширине b_k^{**} . Из-за условности замыкания контура калибра величина ω_k тоже условна.

3. ТИПОВЫЕ СХЕМЫ ПРОКАТКИ ПРОСТЫХ ПРОФИЛЕЙ

3.1. Критерии технологичности систем калибров для прокатки простых профилей

Технологичность систем калибров – совокупность их особенностей, предопределяющих успех профильной прокатки. На рис. 3.1 представлена иерархическая система критериев (идеалов) технологичности. Все эти критерии находятся в отношениях корреляции. Прямая корреляция состоит в том, что при улучшении по одному из критериев одновременно происходит некоторое улучшение и по другому; для некоторых пар критериев – обратная корреляция, когда улучшение, достигаемое по одному критерию, сопровождается ухудшением по другому. В последующих подразделах указанные критерии послужили основой для описания и сопоставления различных схем прокатки. Ради краткости далее система критериев используется не полностью, а в усеченном виде.

3.2. Прокатка в плоском калибре (на гладкой бочке)

Плоский (безручьевого) калибр образован двумя участками гладких бочек двух валков в сборе (см. рис. 3.2). Рассмотрим особенности прокатки в таком калибре с упором на его применение в условиях блюминга-слябинга.



Рис. 3.1. Идеалы технологичности систем калибров

Блюмы получают из слитков, которые имеют квадратное поперечное сечение. Слиток поступает на блюминг и сначала подвергается прокатке в плоском калибре по схеме «квадрат – прямоугольник – квадрат» с кантовками на 90° при соответствующей, от прохода к проходу, установке зазора между валками. Обычно на гладкой бочке блюминга делают от двух до восьми проходов.

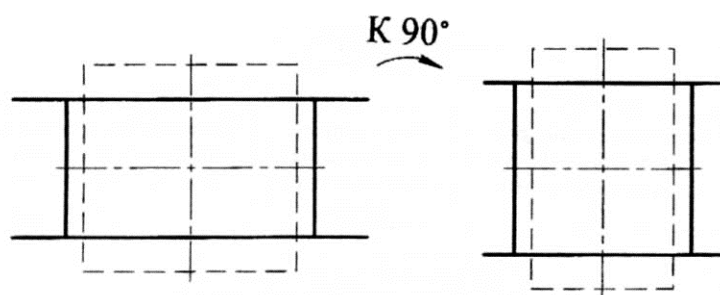


Рис. 3.2

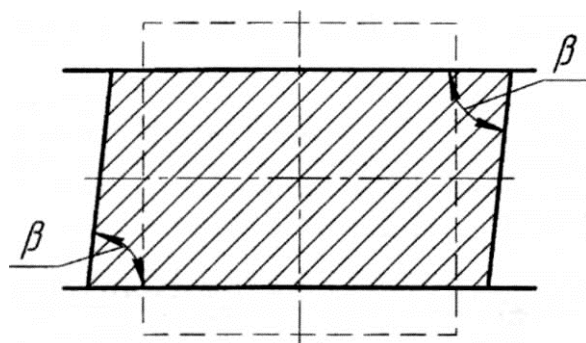


Рис. 3.3

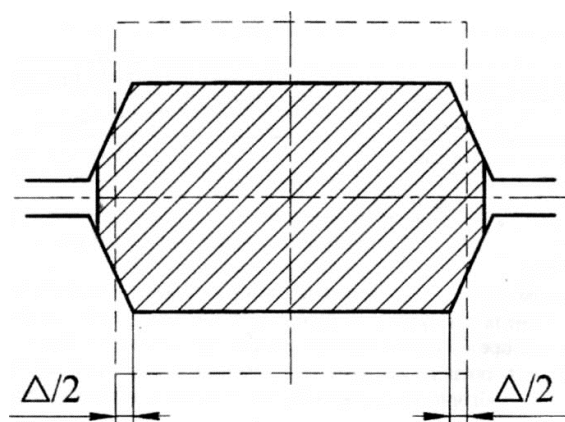


Рис. 3.4:
Δ – «защемление» полосы

Достоинства плоского калибра

1. Гибкость. Прокатку на блюминге начинают в плоском калибре потому, что он обладает высокой гибкостью: позволяет прокатывать и слябы, и блюмы.

Слитки, которые используются на заводах черной металлургии для прокатки блюмов, – это слитки, отлитые в изложницы с литейными уклонами. В процессе прокатки в плоском калибре снимается связанная с уклонами стенок изложницы конусность слитка. Чтобы снять конусность, надо сделать не менее двух проходов с промежуточной кантовкой между ними. Однако сразу после снятия конусности переходить к прокатке в ручьевых калибрах на блюминге нецелесообразно, потому что ручьевые калибры не обладают такой гибкостью, которая свойственна плоскому калибру. Так, плоский калибр не чувствителен к отклонениям размеров слитков от номинальных значений и, более того, позволяет использовать в качестве исходной заготовки слитки существенно различных сечений. В плоском калибре металл прокатывают многократно, устанавливая перед очередным проходом надлежащий зазор между валками; таким образом, не требуется иметь свой калибр под каждый отдельный проход.

Гибкость плоского калибра является настолько большим достоинством, что в последние годы у прокатчиков появилась идея применять плоский калибр не только на блюминге, но и на станах, производящих такие профили, как круги и квадраты небольших сечений. При этом прокатку ведут на гладкой бочке вплоть до последних проходов и только два-три последних прохода делают в ручьевых калибрах, формирующих заданный профиль. Такая схема, получившая название RER-процесса, применяется только за рубежом; распространению его в отечественной практике препятствуют значительные недостатки плоского калибра (см. ниже).

2. Близость к однородности деформации. Прокатка в плоском калибре по схеме «квадрат – прямоугольник – квадрат» обеспечивает преобразование профиля в условиях, близких к однородной деформации². Если пренебречь неоднородностями деформации, связанными с неравномерностью уширения по высоте очага, можно говорить, что здесь обеспечивается равномерность распределения по ширине полосы, и абсолютного, и относительного обжатия. Если же относительное обжатие распределено по ширине полосы равномерно, то в металле не возникают опасные дополнительные (внутренние) напряжения.

3. Дополнительные достоинства. Поскольку плоский калибр является безручьевым, то нет ослабления валков из-за врезов калибра. При прокатке в плоском калибре боковые поверхности очага деформации вертикальны (некоторые отклонения вносятся бочкообразованием), и если окалина хрупкая, то она разрушается и осыпается. Благодаря кантовкам на 90° окалину удаля-

² Отклонения от однородности деформации порождаются уширением, которое неравномерно по высоте очага деформации, что проявляется в виде двойного бочкообразования при прокатке высоких полос и одинарного бочкообразования при прокатке полос умеренной высоты.

ют по всему контуру профиля, и поэтому снижается опасность образования дефекта «вкатанная окалина»

Недостатки плоского калибра

Недостатки плоского калибра связаны поэтому с нарушениями принципа подобия при преобразовании профиля в процессе прокатки в этом калибре.

1. Низкая точность в оформлении профиля. Из-за свободного уширения, неравномерного по высоте полосы, в плоском калибре нельзя получить чистой квадратный профиль, и в этом отношении гибкость плоских калибров ограничена.

2. Сугубо ограниченная вытяжка за проход. Этот недостаток предопределяется тем, что уширение является свободным, а также тем, что полоса склонна к потере устойчивости. Плоский калибр имеет низкую отпорность по сравнению со всеми видами потери устойчивости. В ребровых проходах здесь возможно выпучивание, сваливание. В пластовых проходах возможно искажение поперечного сечения раската в виде так называемого «ромбление» под воздействием неконтролируемых причин – отклонения профиля исходной заготовки от идеального квадрата, перекосов осей валков – и получаемый в пластовом проходе профиль имеет вид параллелограмма с $\beta \neq 90^\circ$ (см. рис. 3.3).

Опасность потери устойчивости тем выше, чем больше обжатие за проход. Это обстоятельство заставляет ограничивать разовые обжатия³. Поскольку обжатия существенно ограничены, то разовые вытяжки понижены. Снижению разовых вытяжек способствует и то, что прокатка в плоском калибре – это прокатка со свободным уширением.

3. Опасность разрушения металла на свободных боковых поверхностях очага деформации. При повышенных обжатиях имеет место ярко выраженное бочкообразование (двойное при малых значениях фактора формы очага деформации $1/h_c$ и одинарное при повышенных значениях $1/h_c$). Такое отклонение от однородности преобразования прямоугольного профиля порождает в боковых частях очага деформации неблагоприятное напряженное состояние. Опасность разрушения также ограничивает разовые обжатия и соответственно вытяжки. Следовательно, при прокатке в плоском калибре, особенно в первых проходах на блюминге, когда структура металла литая, должен быть щадящий режим обжатий.

Разовые вытяжки в плоском калибре составляют величину порядка 1,15...1,20.

³ Упомянутый выше RER-процесс целесообразен только при больших разовых вытяжках, что обеспечивается при использовании специальной проводковой арматуры, надежно удерживающей полосу от потери устойчивости.

3.3. Прокатка в ящичных калибрах

Ящичный калибр отличается от плоского тем, что имеет боковые стенки, которые ограничивают уширение металла. В таком калибре получается профиль в виде прямоугольника (или квадрата) с боковыми скосами, поэтому ящичный калибр иногда называют прямоугольным.

Если ширина заготовки равна ширине по дну калибра или меньше ее, то говорят, что прокатка в ящичном калибре идет без защемления. Если ширина заготовки больше ширины по дну калибра, то говорят, что прокатка идет с защемлением (см. рис. 3.4). В последнем случае стенки калибра сильнее стесняют уширение металла, однако защемление не может быть значительным из-за опасности перепополнения калибра, т. е. при повышенном защемлении в калибре уменьшается простор на уширение металла.

Обычно используется система ящичных калибров, каждый из которых имеет площадь поперечного сечения меньше, чем у предыдущего (рис. 3.5).

Достоинства ящичных калибров

1. Гибкость. У ящичного калибра гибкость не столь значительна, как у плоского, но все же существует: в одном ящичном калибре можно сделать несколько проходов, устанавливая зазор между валками перед каждым очередным проходом. Это позволяет обходиться на блюминге тремя-четырьмя ящичными калибрами, в которых делается до 21....23 проходов.

2. Близость к однородности. Прокатка в системе ящичных калибров – это прокатка по схеме «квадрат – прямоугольник – квадрат». Из-за выпусков калибров профиль получается со скосами боковых граней. Преобразование близко к однородному настолько, что распределение относительного обжатия по ширине полосы при прокатке без защемления равномерно. При прокатке с защемлением обжатие по бокам полосы повышено по сравнению с основной частью полосы, однако это нарушение однородности даже полезно, поскольку создает тенденцию к появлению в боковых зонах очага деформации продольных сжимающих напряжений. Поскольку преобразование «квадрат – прямоугольник – квадрат» в ящичных калибрах близко к таковому в плоском калибре, с боковых свободных поверхностей полосы хорошо удаляется окалина, если только она не склонна к сильному сцеплению с металлом.

3. Обеспечиваемая стесняющим действием стенок калибра повышенная по сравнению с плоским калибром вытяжная способность. Боковые стенки ящичного калибра защемляют металл и тем самым препятствуют потере устойчивости в виде ромбления и сваливания раската. Как следствие такой калибр допускает повышенные разовые обжатия, в отличие от плоского. Поскольку прокатка идет со стесненным уширением, то при заданном обжатии здесь по сравнению с плоским калибром уширение меньше, а вытяжка больше. Защемляя металл с боков, стенки калибра делают более благоприятной схему напряженного состояния на боковых поверхностях. Это позволяет применять повышенные разовые обжатия без опасения, что металл будет разрушен.

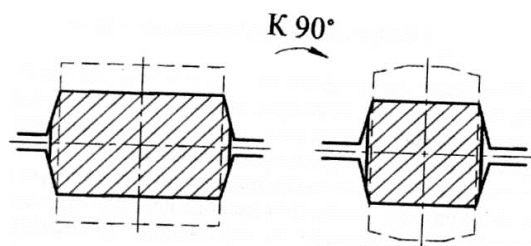


Рис. 3.5

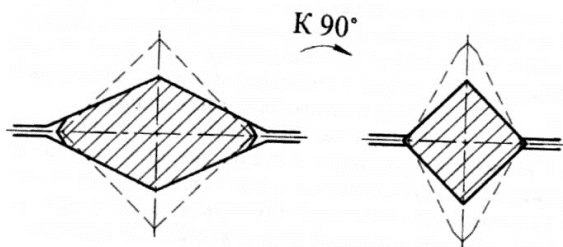


Рис. 3.6

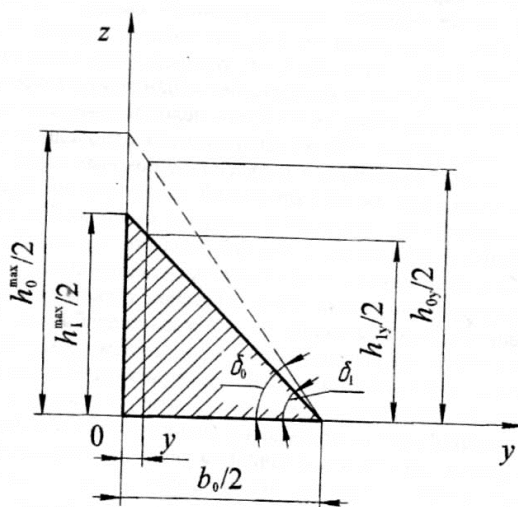


Рис. 3.7

По указанным причинам в сравнении с плоским калибром ящичные калибры обладают большей вытяжной способностью: разовая вытяжка в них может составлять 1,20...1,25. После прокатки в плоском калибре на блюминге переходят к прокатке в калибрах ящичных.

Недостатки ящичных калибров

Недостатки ящичных калибров связаны с отклонениями от однородности в преобразовании профиля по схеме «квадрат – прямоугольник – квадрат».

1. Невозможность получения правильно оформленного прямоугольника или квадрата. Это связано с необходимостью иметь у калибров выпуски.

2. Ослабление валков. Калибр врезан в валки и, следовательно, ослабляет их. В этом одна из причин того, что прокатку на блюминге начинают с плоского калибра и лишь после уменьшения сечения раската переходят к прокатке в ящичных калибрах.

3. Опасность переполнения калибра (опасность затекания металла в зазоры между валками). Переполнение ведет к появлению на полосе так называемых *лампасов* (боковых заусенцев); если лампасы ярко выражены, то в следующих проходах (после кантовки) они будут закатаны в металл, конечный профиль будет дефектным, и его забракуют по статье «закат металла» или придется его подвергать «ремонту» – вырубке дефектного места.

Во избежание опасности переполнения разовые обжатия (и соответственно вытяжки) в ящичных калибрах приходится ограничивать, т. к. технолог, разрабатывая режим обжатий, попадает в сложную ситуацию: чтобы не было переполнения, надо увеличить выпуски, но при этом появляется опасность сваливания полосы в калибре. В связи с чем в условиях блюминга иногда идут на применение двойных выпусков: выпуск при внутренних углах калибра делают 10...15 %, выпуск при переходе к бурту – 20...25%.

Ящичные калибры широко применяются на станах заводов черной металлургии: на блюмингах, в первой группе клетей непрерывно-заготовочных станов, в обжимных и черновых клетях сортопрокатных станов. В цветной металлургии они используются в первых проходах обжимных клетей трио относительно современных станов и обжимных клетей допмель дуо станов устаревшего типа. В качестве чистовых эти калибры не годятся, т. к. они дают профиль грубой конфигурации.

3.4. Прокатка в калибрах системы «ромб – квадрат»

Данную систему (см. рис. 3.6) широко используют на станах заводов черной металлургии, причем к прокатке по схеме «ромб – квадрат» переходят тогда, когда в ящичных калибрах получена квадратная заготовка с сечением порядка 120х120...150х150 мм.

Достоинства системы «ромб – квадрат»

1. Близость преобразования по схеме «квадрат – ромб – квадрат» к однородному. Если бы уширения не было, и прокатка происходила при нулевом зазоре между валками так, что ширина профиля перед проходом равнялась бы ширине калибра, то при отсутствии скругления углов профиля и калибра преобразование квадрат – ромб – квадрат было бы идеально однородным. В реальных условиях можно говорить только о близости к однородности, которая обеспечивает возможность получения товарных квадратов с четко выполненными углами.

2. Гибкость. Она состоит в том, что система может служить не только вытяжной (как система плоских и ящичных калибров), но и в качестве чистовой для получения товарных квадратов.

Если система включает несколько пар калибров ромб – квадрат, то чистовые квадраты можно в случае необходимости получить из промежуточных квадратных калибров.

Существует возможность из одного квадратного калибра получить за счет соответствующей установки валков квадратные профили нескольких смежных размеров.

Простота настройки валков с калибрами системы «ромб – квадрат» позволяет легко переходить с прокатки одного квадратного профиля к прокатке другого с иными размерами и/или из другого металла. Последнее особенно важно при прокатке специальных сталей и ряда медных и медноникелевых сплавов, которые уширяются по-разному.

3. Повышенная вытяжная способность. Данное достоинство предопределяется следующими обстоятельствами.

При прокатке в калибрах системы «ромб – квадрат» велико стесняющее действие стенок калибров, следствием чего является пониженное уширение.

Существует дополнительное обстоятельство, которое значительно снижает его уширение в калибрах системы «ромб – квадрат» при нарушении однородности преобразования профиля. Рассмотрим четвертую часть очага деформации.

Если бы преобразование профиля было строго однородным (см. рис. 3.7), то его текущая вдоль поперечной координаты y начальная высота определялась бы формулой

$$h_{0y}=2(b_0/2-y)tg\delta_0,$$

а конечная текущая вдоль y высота – формулой

$$h_{1y}=2(b_0/2-y)tg\delta_0,$$

при этом текущий вдоль y коэффициент обжатия

$$1/\eta_y=h_{0y}/h_{1y}=tg\delta_0/tg\delta_1=h_0^{\max}/h_1^{\max}=\text{const вдоль } y.$$

Далее, по-прежнему пренебрегая уширением, учтем, что нарушение однородности неизбежно, по крайней мере из-за того, что между валками должен быть оставлен некоторый зазор S (см. рис. 3.8). Тогда

$$h_{0y}=2(b_0/2-y)tg\delta_0, \quad h_{1y}=2(b_{0k}/2-y)tg\delta_1;$$

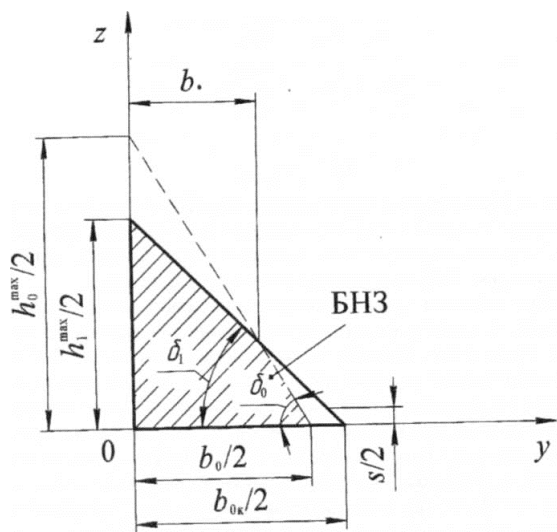


Рис. 3.8

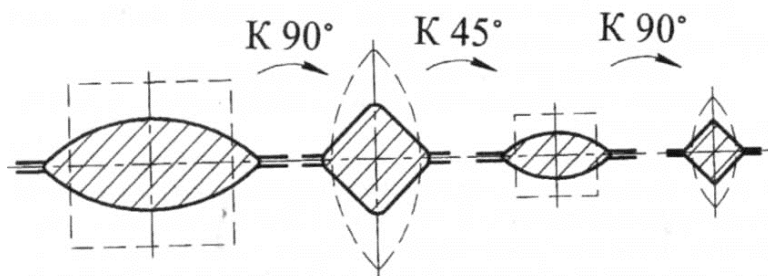


Рис. 3.9

$$\frac{1}{\eta_y} = \frac{(b_0 - 2y) \operatorname{tg} \delta_0}{(b_{0k} - 2y) \operatorname{tg} \delta_1} \neq \text{const},$$

$$\frac{1}{\eta_y^{\max}} = \frac{1}{\eta_y} \Big|_{y=0} = \frac{b_0 \operatorname{tg} \delta_0}{b_{0k} \operatorname{tg} \delta_1} = \frac{h_0^{\max}}{h_1^{\max}},$$

$$\frac{1}{\eta_{\min}} = \frac{1}{\eta_y} \Big|_{y=b_*} = 1.$$

Из-за неравномерного распределения по ширине полосы коэффициента обжатия металл средней части очага деформации (вблизи вертикальной оси симметрии) стремится вытянуться сильнее и тянет за собой металл боковых необжимаемых зон БНЗ, препятствуя развитию уширения.

Калибры системы «ромб – квадрат» обладают высокой устойчивостью по отношению к различным вариантам отклонения полосы от правильного положения. Прокатчики говорят, что в калибрах этой системы обеспечивается *самоцентрирование* полосы: даже при неаккуратной задаче ее в калибр она занимает правильное положение. Устойчивость столь велика, что прокатка в калибрах системы «ромб – квадрат» может идти даже при ручной задаче без применения проводок, и этим широко пользовались на старых заводах. Высокая устойчивость позволяет иметь повышенные обжатия. В части сохранения устойчивости здесь полезны именно высокие обжатия; при малых обжатиях появляется тенденция к свертыванию раската в калибре, т. к. при прокатке с малыми обжатиями уширение настолько мало, что углы профиля, формирующиеся в районе зазора между валками, плохо выполняются (становятся округлыми), и тогда профиль приобретает склонность к потере устойчивости.

Разовые коэффициенты вытяжки при прокатке калибров системы «ромб – квадрат» доходят до 1,50...1,60.

Недостатки калибров системы «ромб – квадрат»

Недостатки калибров системы «ромб – квадрат» столь же значительны, как и их достоинства.

1. Повышенная чувствительность к отклонению от идеальной однородности. Выше было отмечено, что из-за неравномерного распределения по ширине полосы коэффициента обжатия металл боковых внешних зон очага деформации увлекается в вытяжку примыкающей к вертикальной оси симметрии профиля сильно обжимаемой частью. При этом в боковых зонах очага возникают продольные растягивающие напряжения, что создает опасность разрывов по острым ребрам раската, проходящим между валками в районе зазора между ними.

2. Сугубо неоднородное поле температуры по сечению полосы. При прокатке в калибрах системы «ромб – квадрат» раскат имеет ярко выраженные (острые) ребра, которые интенсивно захлаживаются и соответственно теряют пластичность. Это обстоятельство отягощает отмеченный недостаток, поскольку захлаженные ребра оказываются в тех частях очага, в которых возникают дополнительные растягивающие напряжения.

3. Недостатки, связанные с особенностями конфигурации ромбических и квадратных калибров:

- поскольку стенки этих калибров не вертикальны, а сильно наклонены, то окалина, отделяющаяся от металла при прохождении им очага деформации, не столько осыпается, сколько вкатывается в металл;

- в результате значительного изменения диаметра валков по ширине калибра велики соответствующие перепады окружной скорости валков. Следствием является ускоренный износ ромбических и особенно квадратных калибров;

- по сравнению с равновеликим по площади ящичным калибром у квадратного калибра врезы в валки глубже, что снижает как захватывающую способность, так и прочность валков.

Вследствие указанных недостатков система «ромб – квадрат» применяется в качестве вытяжной лишь при прокатке достаточно крупных сечений, когда неравномерность охлаждения раската не приводит к значительному захлаживанию металла в районе ребер из-за «подпитки» их теплотой от массивной сердцевины раската.

3.5. Прокатка в калибрах системы «овал – квадрат»

Особенность данной системы (см. рис. 3.9) – наличие кантовок не только на 90° , но и на 45° .

Эта система широко применяется на мелкосортных и проволочных станах в качестве вытяжной. К прокатке по схеме «квадрат – овал – квадрат» переходят после прокатки по схеме «квадрат – ромб – квадрат», когда сечение профиля уменьшается настолько, что подстыкивание острых ребер раската становится опасным из-за возможности разрушения металла – при прокатке стальной этой сечения порядка $50 \times 50 \dots 80 \times 80$ мм.

Система «овал – квадрат» является сугубо вытяжной, т. е. не годится для получения чистовых квадратов, т. к. схема «квадрат – овал – квадрат» принципиально неоднородна. В этом отношении она выпадает из общего ряда типовых схем прокатки, что предопределяет как ее достоинства, так и недостатки.

Достоинства системы «овал – квадрат»

(позитивная сторона принципиального отклонения от однородности)

1. Благоприятная схема кантовок:

- чередование кантовок на 90° и 45° ведет к тому, что прокатываемый профиль получает обжатия попеременно в четырех направлениях (см. рис. 3.10, стрелками показаны направления обжатия полосы в проходах с первого по четвертый), что обеспечивает хорошую проработку (измельчение структуры металла) по всему сечению полосы;

- из-за чередования кантовок на 90° и 45° при прокатке квадрата в овале ребра овального раската формируются из плоских граней квадратного,

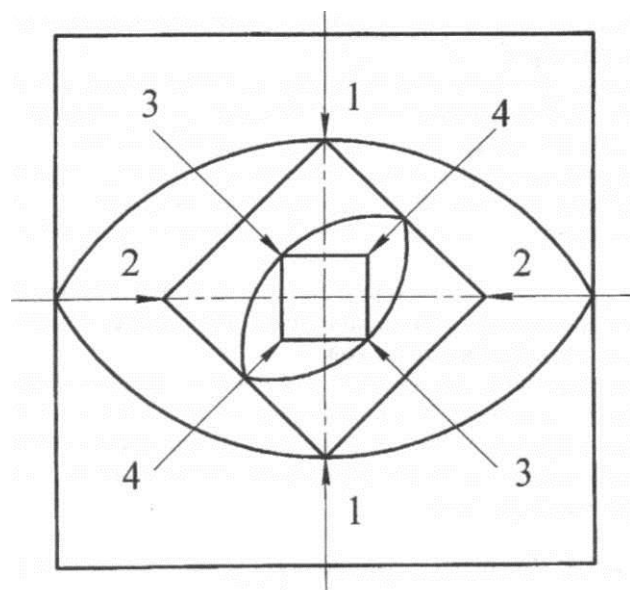


Рис. 3.10

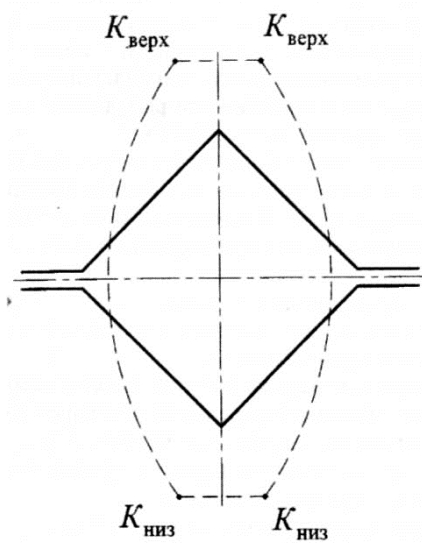


Рис. 3.11

при прокатке овала в квадрате аналогичным образом формируются ребра квадратного раската в районе зазора между валками, тем самым обеспечивается систематическое обновление углов прокатываемого профиля и выравнивание распределения температуры по сечению полосы. Это в свою очередь предопределяет возможность вести прокатку с повышенными вытяжками, не опасаясь разрушения металла по ребрам раската.

2. Повышенная вытяжная способность, как потенциальная, так и фактически реализуемая. При прокатке квадрата в овале с большим соотношением осей разовая вытяжка может достигать до 2,0; при прокатке получаемого при этом овала в последующем квадратном калибре – до 1,8.

3. Врезы овальных калибров относительно неглубоки.

Недостатки системы калибров «овал – квадрат»

(негативная сторона принципиального отклонения от однородности)

1. Высокая чувствительность к усилению неоднородности при незаполнении овального и/или квадратного калибра:

- Если существенно не заполнен овальный калибр, то выходящий из него профиль – это овал с тупыми (округлыми) ребрами. Во-первых, устойчивость такого овала в квадратном калибре понижена. Во-вторых, при прокатке тупого овала в квадратном калибре при входе металла в валки между точками первого касания металла и валков (на рис. 3.11 точки $K_{\text{верх}}$ и $K_{\text{низ}}$) возникает поперечное перемещение металла, направленное к вертикальной оси симметрии полосы, и из-за своеобразной потери устойчивости по верхней и нижней линиям $K_{\text{верх}} - K_{\text{верх}}$ и $K_{\text{низ}} - K_{\text{низ}}$ на металле получаются морщины;

- если существенно не заполнен квадратный калибр, то выходящий из него профиль имеет сильно притупленные углы при горизонтальной оси, и при прокатке в следующем овальном калибре деформация асимметрична относительно вертикальной оси калибра (см. рис. 3.12). В результате возникает момент M , скручивающий раскат на выходе из калибра. Если квадратная полоса незаполненного сечения передается по обводному аппарату (это практикуется на линейном стане), то при задаче в овальный калибр квадрат располагается вертикально, что порождает образование на полосе «прирезов» и «закатов» (избежать это удастся, если ширина овального калибра берется больше, чем то значение, которое соответствует задаче квадрата плашмя);

- при проходе полосы через квадратный калибр металл в вершинах калибра из-за контакта с холодными валками охлаждается сильнее металла в районе зазора между валками. Более подстуженные ребра квадрата при прокатке в следующем овальном калибре размещаются относительно оси косо-симметрично, что создает некоторый скручивающий момент даже при идеальной геометрической симметрии квадратного профиля⁴.

⁴ В двух последних случаях скручивающий момент можно компенсировать соответствующим поперечным сдвигом ручьев овального калибра относительно друг друга.

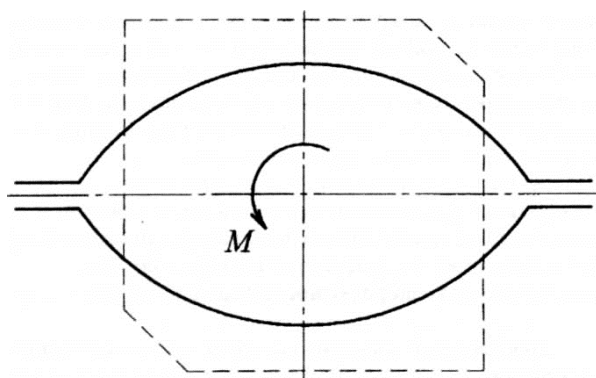


Рис. 3.12

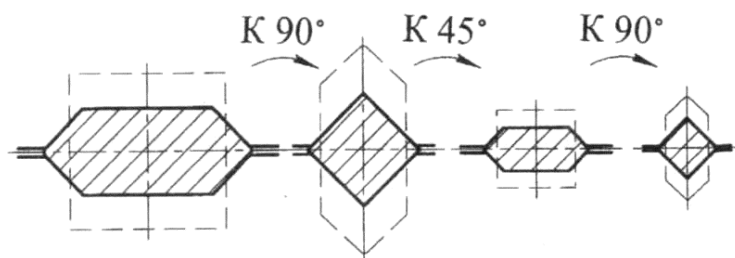


Рис. 3.13

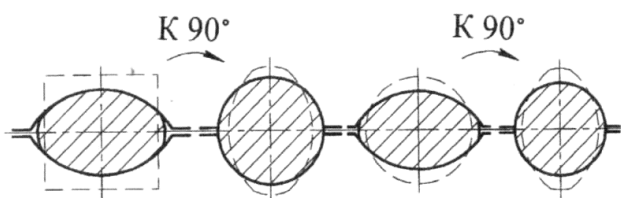


Рис. 3.14

Из-за высокой чувствительности схемы прокатки в калибрах системы «овал – квадрат» к незаполнению квадратного и овального профилей требуется применять тесную проводковую арматуру, которая хорошо удерживала бы от сваливания как овальные, так и квадратные полосы. Однако проводки, жестко удерживающие раскат от сваливания, создают задиры на полосе и сами интенсивно изнашиваются.

2. Неравномерность распределения коэффициента обжатия по ширине полосы, особенно значительная при прокатке овала в квадратном калибре. Приводит к появлению в очаге деформации дополнительных растягивающих напряжений в средней части (по ширине) полосы, прокатываемой в овальном калибре, и, что более опасно, в боковых частях полосы, прокатываемой в квадратном калибре.

3. Система «овал – квадрат» требует применения кантующих проводок, в т. ч. и на непрерывных станах с чередующимися горизонтальными и вертикальными клетями. В современных прокатных блоках с малыми расстояниями между клетями, что не позволяет использовать кантующие проводки, эта система вообще неприменима. Однако возможны попытки обойтись без специальных кантующих устройств за счет преднамеренного незаполнения квадратных калибров или за счет взаимного поперечного смещения ручьев в составе овальных калибров.

3.6. Прокатка в калибрах системы «шестиугольник – квадрат»

Данную систему (см. рис. 3.13) можно рассматривать как модифицированный вариант системы «овал – квадрат», в которой каждый овальный калибр заменен шестиугольным калибром той же ширины, равновеликим по площади сечения (не случайно шестиугольник сортовики иногда называют «шестиугольным овалом», в Германии – «шведским овалом»). Система имеет те же достоинства, то же назначение и применяется в тех же условиях, что и система «овал – квадрат».

Однако замена схемы прокатки «квадрат – овал – квадрат» на схему «квадрат – шестиугольник – квадрат» дает и дополнительные преимущества. Они предопределяются тем, что такая замена ослабляет неоднородность преобразования профиля. Эти *преимущества* таковы.

1. При прокатке в шестиугольном калибре квадрата с шириной, равной ширине калибра по дну, коэффициент обжатия одинаков по ширине полосы; при прокатке аккуратно выполненного шестиугольника в квадратном калибре абсолютное обжатие по ширине полосы одинаково, а коэффициент обжатия изменяется не настолько резко, как в базовом варианте.

2. При задаче шестиугольного профиля в квадратный калибр устойчивость повышена.

3. Проводки для шестиугольного профиля значительно проще, проводок для овального.

3.7. Прокатка в калибрах системы «овал – круг»

Такая система (см. рис. 3.14) применяется как чистовая (при прокатке кругов), а также в качестве вытяжной при прокатке металлов и сплавов с повышенной пластичностью.

При передаче раската из калибра в калибр этой системы можно обойтись без кантовки круга. При использовании калибров системы «овал – круг» на станах с чередующимися горизонтальными и вертикальными клетями полоса идет от клетки к клетке (из калибра в калибр) вообще без кантовок. Данное обстоятельство является особенно ценным в условиях прокатки в современных двухвалковых проволочных блоках, имеющих малые межклетевые промежутки.

Достоинства калибров системы «овал – круг»

Достоинства калибров системы «овал – круг» проявляются при прокатке с небольшими разовыми обжатиями.

1. При небольших разовых обжатиях преобразование по схеме «круг – овал – круг» приближается к идеально однородному, что позволяет получать идеальные чистовые круги.

2. Изначальная технологическая гибкость: возможность получения чистовых кругов повышенных диаметров из промежуточных круглых калибров.

3. Отмеченная выше возможность прокатки металлов и сплавов с низкой пластичностью, что предопределяется отсутствием дополнительных растягивающих напряжений и тем, что округлый профиль не имеет частей, склонных к интенсивному охлаждению, т. е. у раската нет ярко выраженных ребер.

Недостатки калибров системы «овал – круг»

1. При прокатке овала в круге велика опасность переполнения, т. к. круглый калибр в районе разъема имеет крутые стенки и небольшое избыточное уширение приводит к затеканию металла в зазоры между валками.

2. Низкая устойчивость против сваливания при прокатке овальной полосы в круглом калибре и как следствие повышенные требования к вводным проводкам.

3. Большие разовые обжатия и вытяжки в круглом калибре недопустимы, а следовательно, они не могут быть большими и при прокатке круга в овале (т. к. здесь недопустимы овалы с большими соотношениями осей). Разовая вытяжка при прокатке в калибрах системы «овал – круг» не превышает 1,30...1,35.

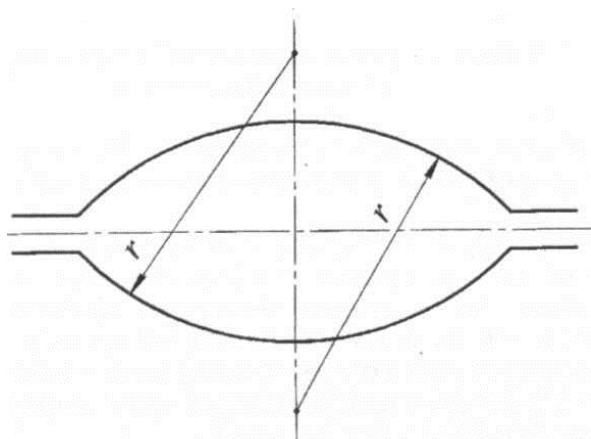


Рис. 3.15

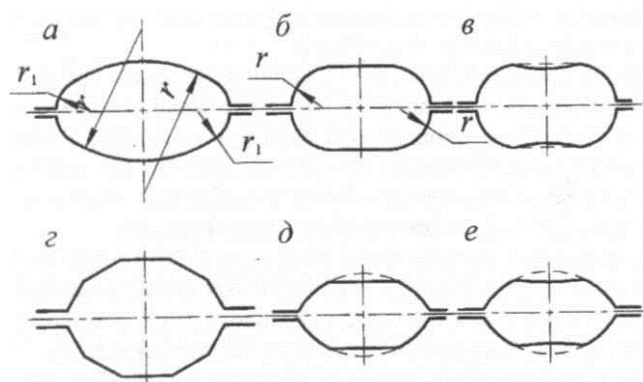


Рис. 3.16

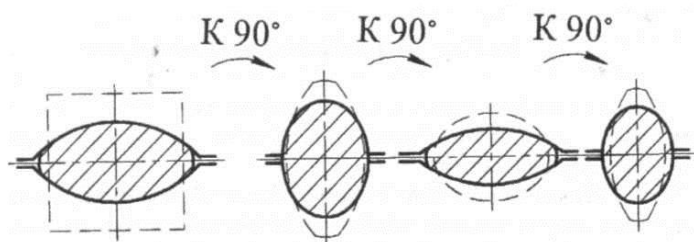


Рис. 3.17

3.8.Разновидности овального калибра в составе системы «овал – круг»

С целью приглушить недостатки системы «овал – круг» разработаны и применяются разнообразные варианты овального калибра в составе данной системы.

Простейший вариант – однорадиусный овальный калибр (см. рис. 3.15), выполненный двумя дугами равных радиусов. Этот овал применяют обычно в составе системы «овал – квадрат», обеспечивая при прокатке заполнение овала, близкое к 100 %, и тем самым получая профиль «остроугольный овал». Однорадиусный овал в составе системы «овал – круг» годится лишь в том случае, если в овальном калибре прокатка идет с незаполнением, так что получаемый профиль приближается к эллипсу.

Двухрадиусный (эллиптический) овал описывают двумя радиусами (см. рис. 3.16, *а*). По своей форме такой овал ближе к кругу, чем однорадиусный, и поэтому при использовании его получается круглый профиль более точных размеров. Эллиптические овалы применяют в качестве предчистовых калибров при прокатке крупных кругов.

Плоский овал (рис. 3.16, *б*) – калибр, заготовкой для которого служит квадратный профиль; получаемый плоскоовальный профиль хорошо удерживается в простых проводках при задаче в следующий калибр. Плоскоовальные калибры применяются при прокатке кругов больших сечений. Иногда плоскоовальный калибр выполняют с выпуклым дном (см. рис. 3.16, *в*), что предупреждает переполнение следующего калибра.

Многогранный предчистовой овал (рис. 3.16, *г*) используют при прокатке кругов диаметром 150 мм и более. Обычно такой калибр бывает десятигранным. Полоса с профилем десятигранного овала устойчива на рольганге и не требует сложной арматуры для задачи в круглый калибр.

Наличие уплощенных участков у овального калибра допустимо, когда требования по точности круглого профиля не являются слишком жесткими. В таких случаях можно также применять уплощенный овал (см. рис. 3.16, *д*) и овал с пережимом (рис. 3.16, *е*).

3.9. Системы неравноосных калибров

Каждая из типовых систем калибров (например, ромб – квадрат, овал – квадрат, овал – круг) может быть в общем названа системой «неравноосный калибр – равноосный калибр».

Если система калибров не является чистовой, то, очевидно, построение ее в варианте «неравноосный калибр – равноосный калибр» отнюдь не обязательно. При прокатке простых профилей в качестве вытяжных возможны и такие комбинации калибров, каждая из которых может быть названа системой «неравноосный калибр – неравноосный калибр».

В 60-70-е гг. XX в. на линейных станах для прокатки качественных сталей с малыми разовыми вытяжками применялась система «ромб – ромб»

(система ромбических калибров с одинаковым соотношением осей). Сегодня на некоторых зарубежных непрерывных станах находит применение система «овал – овал» (система овальных калибров с одинаковым соотношением осей; прокатка в чередующихся горизонтальных и вертикальных клетях идет без кантовок полосы).

Наиболее широкое применение система «неравноосный калибр – неравноосный калибр» получила в варианте системы «овал – ребровой овал» (рис. 3.17). Ребровой овальный калибр имеет обычно контур двухрадиусного (эллиптического) овала, размещенного относительно валков на ребро, т.е. врезанного в валки вертикально.

Вытяжка в калибрах «овал – ребровой овал» больше, чем в калибрах системы «овал – овал», и даже больше, чем в калибрах «овал – круг». Это связано с тем, что устойчивость овала в ребровом овальном калибре повышена, и поэтому в ребровом овале можно вести прокатку с увеличенным обжатием, используя овальную заготовку с повышенным соотношением осей. Поскольку здесь допустимы повышенные соотношения осей, то соответственно допустимы повышенные обжатия и в предшествующем обыкновенном овальном калибре.

Прокатка овала в овале плашмя (см. рис. 3.17) оправдывается тем, что из-за повышенной ширины полосы уширение понижено, и почти весь обжатый металл уходит в вытяжку; нет проблемы с устойчивостью и калибр достаточно плотно охватывает полосу по периметру, что способствует повышению пластичности металла.

Профиль, полученный в ребровом овальном калибре, можно прокатывать в очередном обыкновенном овале на ребро, а не плашмя. Обжатие при этом будет сдерживаться условием устойчивости ребрового овала в овале, размещающемся плашмя. Кроме того, возникнут проблемы с пластичностью металла в районе боковых внешних зон, которые будут значительно развиты.

Разовые вытяжки при прокатке в калибрах системы «овал – ребровой овал» составляют до 1,40...1,50.

3.10. Нетиповые схемы прокатки с использованием слабо заполненных ручьевых калибров

Для процессов прокатки простых профилей в ручьевых калибрах характерно, что степень заполнения каждого отдельного калибра δ близка к единице, т. е. конечная ширина полосы близка к ширине калибра, а значит конечная площадь полосы близка к площади калибра. Ситуации, когда незаполнение ручьевого калибра значительно ($\delta \ll 1$), могут быть весьма нежелательными. Например, как уже отмечалось в п. 3.5, при прокатке в калибрах системы «овал – квадрат», если $\delta \ll 1$ в квадратном калибре, то появляется тенденция к закручиванию полосы относительно продольной оси в следующем за квадратом овальном калибре.

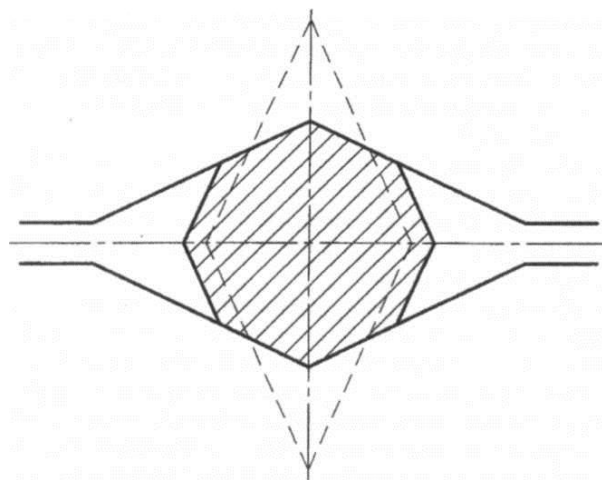


Рис. 3.18

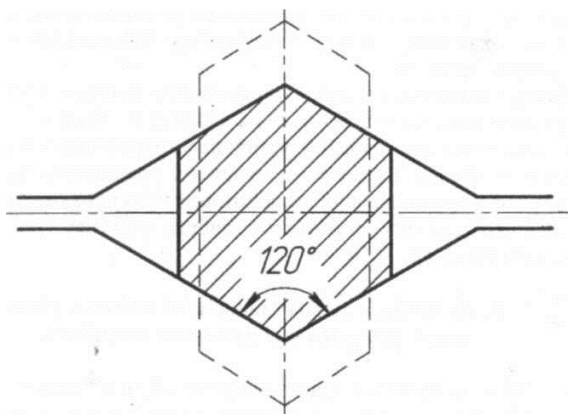


Рис.3.19

Однако возможны и такие ситуации, когда прокатка с существенным незаполнением ($\delta \ll 1$) оказывается целесообразной. Рассмотрим некоторые из таких вариантов.

В п. 3.9 было отмечено, что на зарубежных непрерывных станах находит применение система калибров «овал – овал». При этом прокатка идет с малым заполнением каждого овального калибра ($\delta \approx 2/3$).

Если прокатка идет в калибрах системы «ромб – ромб», то при прокатке ромбической заготовки в ромбическом калибре с малой степенью заполнения получают восьмиугольный профиль (вчерне оформленный квадрат). Для формирования ромбического и восьмиугольного профилей можно использовать один и тот же ромбический калибр (см. рис. 3.18).

При прокатке шестиугольного профиля в ромбическом калибре с малым заполнением получают равносторонний шестиугольник (шестигранник), см. рис. 3.19.

Последний пример показывает, что в случае, если технолог ориентируется на прокатку с $\delta \ll 1$, то перед ним открывается возможность использования нетиповых комбинаций калибров (в последнем примере система калибров «шестиугольник – ромб»). Нетиповые комбинации могут иметь дополнительные достоинства.

4. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О КАЛИБРОВКЕ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ

4.1. Задачи калибровки валков в свете общих требований к профильной прокатке

Спроектировать калибровку прокатных валков – это значит решить следующие задачи.

1. Выбрать систему калибров, обеспечивающую получение заданных товарных профилей из исходной заготовки.
2. Определить размеры калибров.
3. Разместить эти калибры на валках клетей сортопрокатного стана.
4. Рассчитать режим обжатий при прокатке полосы в калибрах выбранной системы.

Данные задачи взаимосвязаны и решаются в совокупности по методу последовательных приближений. Результаты решения в значительной мере предопределяются тем, что калибровка должна быть ориентирована на выполнение многочисленных требований потребителя профильного проката. На прилагаемой схеме (см. рис. 4.1) представлены требования к калибровке, вытекающие из технических потребностей потребителя. Его экономическая потребность – доступная цена проката. Соответствующие требования к калибровке валков представлены на второй прилагаемой схеме (см. рис. 4.2).



Рис. 4.1. Иерархическая схема технических требований к профильной прокатке

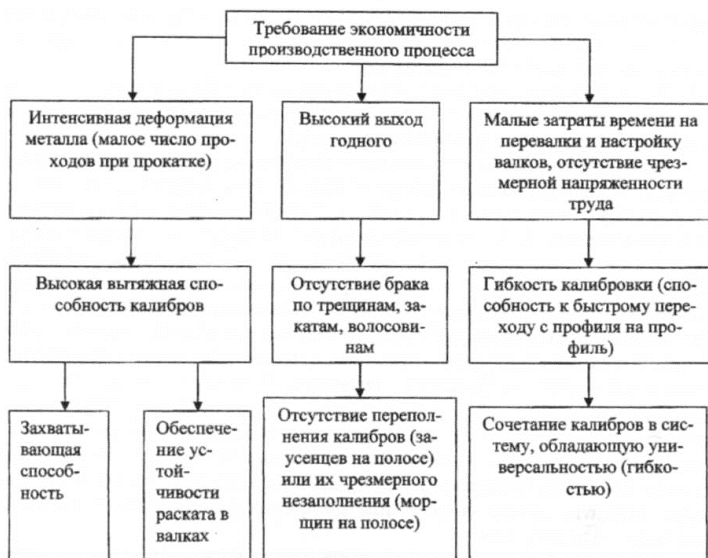


Рис. 4.2. Иерархия потребностей, определяющих выбор системы калибров

4.2. Общие принципы конструирования чистового калибра

Чистовой калибр должен быть таким, чтобы получаемый в нем чистовой профиль соответствовал требованиям стандартов. Чистовой калибр конструируют с учетом температурной усадки металла, допусков на размеры профиля, износа калибров и упругой отдачи валков, т. е. в соответствии со следующим алгоритмом.

1. В общем случае приходится различать горячий и холодный профили – профиль на выходе из чистового калибра и профиль после охлаждения до температуры цеха. Размеры горячего и холодного профилей связаны соотношением

$$[\text{Горячий размер}] = k[\text{Холодный размер}],$$

при этом

$$[\text{Температурная усадка чистового профиля при охлаждении}] = (k - 1)[\text{Холодный размер}],$$

где k – коэффициент температурного расширения металла при изменении значения температуры от комнатной до значения окончания прокатки. Для стали $k \approx 1,015$, для титана и его сплавов $k \approx 1,005$, для меди $k \approx 1,0165$.

Если бы различия между размерами чистового калибра и готового профиля порождались только температурной усадкой, то следовало придержи-

ваться правила: размеры чистового калибра по сравнению с размерами товарного профиля должны быть больше на величину усадки металла при его охлаждении после окончания прокатки.

2. В стандартах указаны номинальные размеры профиля и допуски на эти размеры (верхние и нижние). Тогда на какие размеры следует ориентироваться при конструировании чистового калибра?

Если ориентироваться на получение профиля максимально допустимых размеров, то калибр довольно быстро выйдет из строя по износу, т. к. уже незначительный износ калибра приведет к получению профиля с размерами выше стандартных. Если же ориентироваться на получение профиля минимально допустимых размеров, то калибр будет работать долго, поскольку несмотря на износ он будет выдавать профиль, имеющий размеры, которые соответствуют полям допусков. Профиль с минимально возможными размерами выгоден с экономической точки зрения, т. к. он обладает надлежащими потребительскими свойствами в связи с тем, что металла на его изготовление израсходовано меньше. Прокатка с ориентацией на получение профиля минимально допустимых размеров называется «прокаткой на минус». Такая прокатка требует повышенной культуры производства, поскольку связана с опасностью выхода за пределы стандарта в сторону занижения размеров. Тем не менее технологи придерживаются правила: конструируя чистовой калибр, следует ориентироваться на получение чистового профиля в минусовом (а не плюсовом) поле допусков.

3. Высота профиля получается больше, чем высота калибра на холостом ходу рабочей клетки. Превышение связано с упругой отдачей («игрой») валков. Насколько велика упругая отдача, зависит от жесткости валков и клетки в целом. Чтобы жесткость была выше, требуется тщательная подгонка друг к другу узлов и деталей рабочей клетки, устранение люфтов. Технологи определяют «игру» валков экспериментально и занижают высоту калибра на величину упругой отдачи клетки.

Во избежание ускоренного износа чистового калибра вытяжка металла в нем должна быть невелика. К тому же при пониженной вытяжке чистовой профиль получается точнее по размерам и форме (если, конечно, предчистовой профиль сформирован аккуратно). Конкретно вытяжка в чистовом калибре обычно составляет величину не более 1,10...1,15. Повышенные вытяжки допустимы тогда, когда после прокатки предусмотрена доводочная обработка чистового профиля, например калибрование или волочение.

4.3. Особенности калибровки валков для прокатки полосок

Полоски – это прямоугольные профили с небольшой толщиной и повышенной шириной, однако не столь значительной, как у листов. На некоторых заводах цветметобработки полоски называют шинами.

Простейший способ прокатки полосок – это прокатка на гладкой бочке по схеме плющения (за один или несколько проходов) квадрата или круга (см. рис. 4.3). Очевидные недостатки данного способа таковы: 1) свободное

уширение металла, которое из-за воздействия случайных причин может быть неодинаковым по ширине раската; 2) округлые кромки у раската из-за подпирającego действия поперечных сил трения на контакте полосы с валками. Для ликвидации разноширинности раската и округлости кромок применяют ребровые калибры. Ребровой калибр для полосы (см. рис. 4.4) – это своего рода ящичный калибр, отличающийся тем, что он сильно вытянут по высоте, имеет малые уклоны боковых стенок (5...10 %) и небольшую выпуклость высотой 0,5... 1 мм по дну каждого ручья. Обжатие в таком калибре невелико (5...15%). Повышенное обжатие здесь вообще невозможно из-за ограничения по устойчивости полосы в калибре. Но большого обжатия и не требуется, поскольку функция такого калибра – прогладка кромок полосы. Благодаря выпуклости дна ручьев полоса после ребрового прохода имеет слабовогнутые кромки, которые в следующем пластовом проходе становятся вертикальными.

Если полоска имеет большое соотношение осей, то в ребровом калибре велика опасность потери устойчивости даже при прогладочном обжатии, поэтому полосы повышенной ширины (более 80 мм) прокатывают в закрытых калибрах (см. рис. 4.5). Уклоны стенок такого калибра невелики (3...5% в подготовительных и 1...1,5 % в чистовых калибрах). Прокатка в этих случаях идет со стесненным уширением, т. е. ширина полосы строго контролируется калибром, бочкообразования по кромкам нет и не требуется прогладка кромок в ребровых калибрах. Недостатки данного способа таковы: 1) закрытый калибр отличается ускоренным износом боковых стенок; 2) под каждую конкретную ширину полосы надо иметь свой закрытый калибр, т. е. этот способ прокатки полосок не обладает гибкостью.

4.4. Особенности калибровки валков для прокатки квадратов

Если требуется получить чистовой квадратный профиль, то чистовой калибр должен быть квадратным. Предчистовой калибр должен быть ромбическим, чтобы у чистового квадрата были сформированы достаточно острые ребра, как того требует стандарт. Угол ромба при меньшей диагонали $\beta = 100...120^\circ$ (см. рис. 4.6), причем β берется тем меньше, чем больше сторона чистового квадрата – в соответствии с правилом «чем больше квадрат, тем меньше вытянут ромб». Подготовительный (третий против хода прокатки) калибр обычно квадратный. Подготовительный профиль можно получить по любой схеме, приводящей к квадрату: ромб – квадрат, овал – квадрат, шестиугольник – квадрат. Если ставится задача обеспечить гибкость калибровки (получение чистовых квадратов повышенных размеров из промежуточных квадратных калибров), то следует многократно применять систему «ромб – квадрат».

Температура металла по сечению квадрата, выходящего из чистового калибра, не одинакова: в углах у разъемов валков она выше, в углах при вертикальной диагонали ниже, т. к. последние формируются в контакте с

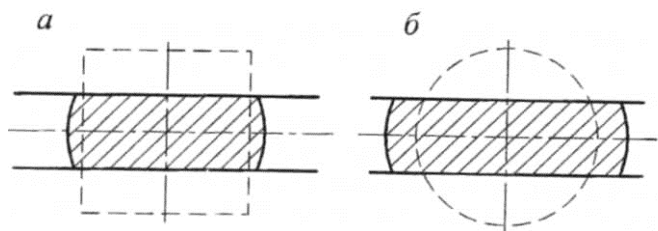


Рис. 4.3

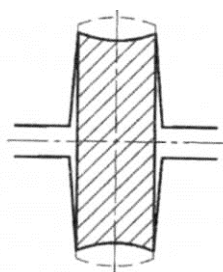


Рис. 4.4

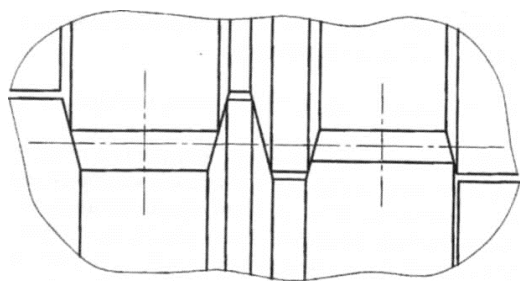


Рис. 4.5

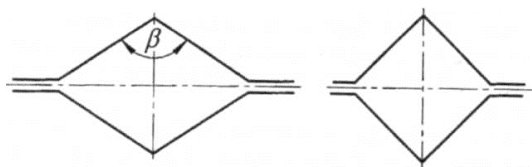


Рис. 4.6

холодными валками. В результате температурная усадка чистового профиля при охлаждении до значения температуры цеха по вертикальной и горизонтальной диагоналям неодинакова. Разница в величине усадки по диагоналям тем существеннее, чем значительнее коэффициент температурного расширения металла и крупнее профиль.

При прокатке стальных квадратных полос со стороной более 15...25 мм чистовой квадратный калибр проектируют с компенсацией разницы в усадке по диагоналям, придавая ему конфигурацию ромба с углами при вертикальной диагонали $90^{\circ}30' \dots 91^{\circ}30'$, причем этот угол берут тем больше, чем больше сторона квадрата. Когда остывает горячекатаная квадратная полоса, тогда горизонтальная диагональ профиля укорачивается сильнее, и квадрат принимает правильную форму.

Чтобы обеспечить формирование аккуратных углов чистового квадрата, углы предчистового ромбического и чистового квадратного калибров не закругляют.

При прокатке квадратов со стороной до 30 мм предчистовые ромбические калибры обычной конфигурации не позволяют получать квадраты с правильными углами по линии разреза валков. Чтобы обеспечить получение квадратов с аккуратно выполненными вершинами, в конструкции предчистового ромба предусматривают острые углубления с углом 90° при малой диагонали ромба (см. рис. 4.7).

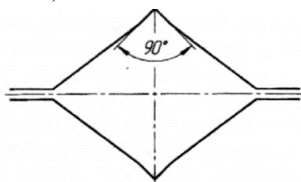


Рис. 4.7

4.5. Особенности калибровки валков для прокатки кругов

Если требуется получить чистовой круглый профиль, то чистовой калибр должен быть круглым. Предчистовой калибр должен обеспечивать получение овального профиля, близкого по конфигурации к эллипсу, что достигается некоторым незаполнением в однорадиусном овальном калибре и тем более в двух- и трехрадиусном овальном калибрах. Если требования по точности формы чистового круга не слишком жесткие (например потому, что предусматривается последующее калибрование профиля), то предчистовой профиль может быть плоскоовальным, получаемым в плоскоовальном калибре или даже плущением подготовительного круга на гладкой бочке.

Соотношение осей предчистового овала при прокатке мелких и средних кругов берут порядка 1,5...2. Оно тем больше, чем больше диаметр чис-

тового круга, в соответствии с правилом «чем больше круг, тем меньше вытянут овал».

Предыдущие по ходу прокатки калибры приемлемы в любом варианте, приводящем к надлежащему подготовительному (предовальному) профилю. Конкретные ограничения, накладываемые на выбор этих систем, связаны с обстоятельствами, которые обсуждались при рассмотрении отдельных систем в разд. 3.

В качестве подготовительной можно использовать систему «овал – квадрат». При этом предчистовому овалу будет предшествовать квадратный калибр. Прокатывая квадратную заготовку в предчистовом овале, довольно трудно получить овал с округлыми ребрами. Если же пойти на заполнение овального калибра, близкое к единице, то при малом зазоре между валками овал, наоборот, будет получаться с ярко выраженными ребрами. Найти и стабильно выдержать при прокатке эту степень заполнения, которая давала бы овал с округлыми ребрами, довольно сложно. Кроме того, системе «овал – квадрат» присущ такой существенный недостаток, как опасность образования на металле морщин при прокатке овала с тупыми ребрами (плохо заполненного овала) в квадратном калибре. Если речь идет о прокатке кругов из цветных металлов и сплавов, более предпочтительна система в варианте «овал – круг».

В условиях цветметобработки у многократно примененной системы «овал – круг» проявляется универсальность (гибкость), т. е. каждый промежуточный круглый калибр при необходимости можно использовать как чистовой для получения круга повышенного диаметра. Это важное достоинство, поскольку прокатка цветных металлов и сплавов идет, как правило, небольшими партиями, т. е. имеет место малотоннажная прокатка.

В 80-90-е гг. XX в. годы при прокатке кругов, в т. ч. на заводах цветметобработки, широко используются калибры системы «овал – ребровой овал».

Если чистовой калибр является идеально круглым и соответственно выдает идеально круглый профиль, то при последующем охлаждении такого круга усадка металла по вертикальному и горизонтальному диаметрам профиля не одинакова. Чтобы предотвратить искажение формы чистового круга при его охлаждении, чистовой калибр делают несколько сплюснутым по высоте. Конкретно горизонтальный диаметр чистового калибра берут на 0,5...1% больше, нежели диаметр вертикальный. Это делают, когда идет прокатка металла, склонного к заметной температурной усадке (стали) и когда площадь поперечного сечения чистового профиля значительна (диаметр более 15...25 мм).

4.6. Особенности калибровки валков для прокатки круглых прутков из титановых сплавов

Круги из титановых сплавов прокатываются в широком сортаменте малыми партиями. Отсюда следует, что калибровка прокатных валков должна быть максимально гибкой (универсальной). Особенности ее также состоят в

том, что исходной заготовкой здесь является круг, и даже в начале прокатки не применяются калибры с четко выраженными углами – ящичные, ромбические, квадратные.

Калибры, в которых формируется профиль с ярко выраженными ребрами, не применяются из-за теплофизических особенностей титана и его пониженной пластичности. Титан довольно активно отдает теплоту холодным валкам, но поскольку по сравнению со сталью он обладает высокой теплоемкостью и низкой теплопроводностью, то не происходит выравнивания температуры по сечению титанового профиля, что порождает при прокатке высокую неоднородность деформации со всеми вытекающими отсюда последствиями. В итоге получается, что при прокатке титана калибры с существенной неоднородностью преобразования профиля вообще неприемлемы.

4.7. Универсальные системы калибров для прокатки кругов (на примере металлургического завода им. А.К. Серова)

Для производства широкого сортамента круглых профилей из качественных сталей малотоннажными партиями с успехом применяется универсальная калибровка «гладкая бочка – ребровой калибр – овал – круг» (см. рис.4.8, *а*). При использовании одного комплекта предчистового и подготовительных калибров гибкая калибровка позволяет за счет соответствующей настройки валков получать из одного предчистового овального калибра на стане 450 3...10, а на стане 320 3...6 различных по диаметру круглых профилей. Универсальность (гибкость) калибровки тем значительнее, чем больше диаметр прокатываемых профилей.

Универсальная калибровка обеспечивает упрощение монтажей калибров, сокращение парка валков, сокращение простоев и перевалок, что имеет особое значение при прокатке широкого сортамента. Другие достоинства системы связаны с наличием больших зазоров в подготовительных калибрах: отсутствие опасности переполнения, хорошее удаление окалины и, следовательно, высокое качество поверхности проката.

Однако универсальная система не лишена недостатков, главным из которых является невозможность получить значительные вытяжки, в связи с чем система неприемлема для прокатки наименьших в сортаменте профилей. Кроме того, из-за небольшой разноосности сечения полосы, получаемой в ребровом калибре (1,1...1,25), она неустойчива в скантованном положении и при передаче ее по обводному аппарату линейного стана иногда скручивается в овальном калибре, что приводит к колебаниям формы и размеров готового профиля.

Эти недостатки были устранены модифицированием универсальной системы (см. рис. 4.8, *б*). Вместо овального калибра введен плоский

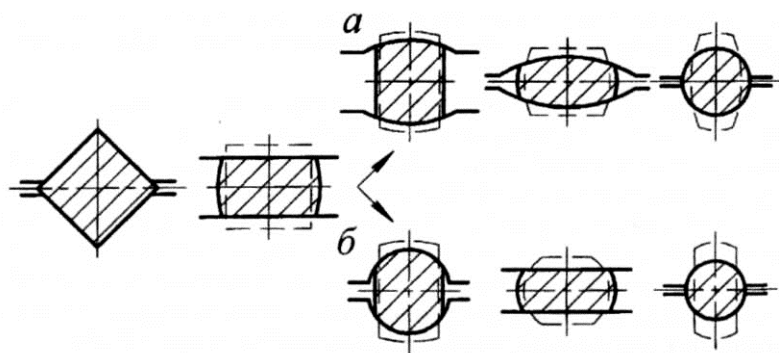


Рис. 4.8

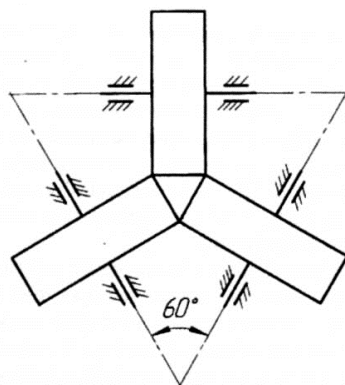


Рис. 4.9

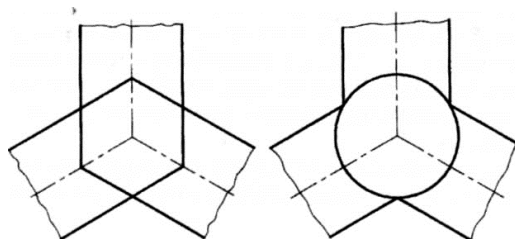


Рис. 4.10

предчистовой калибр, т. е. гладкая бочка. Ребровой калибр заменен круглым подготовительным калибром, работающим с некоторым незаполнением.

Использование в составе универсальной калибровки подсистемы «предчистовая гладкая бочка – круг» взамен подсистемы «овал – круг» является естественным развитием универсальной калибровки, обеспечивающим повышенные коэффициенты вытяжки, значительную унификацию схем прокатки, а также простоту освоения калибровки благодаря компенсации допускаемых в расчетах погрешностей путем регулировки зазора в проходе на гладкой бочке. Однако при этом является ухудшение оформления круглого чистового профиля в районе разъемов круглого чистового калибра. Данный недостаток не является существенным, если после прокатки предусмотрено калибрование профиля (доводка его до кондиции по размерам и форме).

4.8. Безручьевые и ручьевые многовалковые калибры

Это калибры, образованные валками, число которых более двух. Находят применение трех- и четырехвалковые калибры.

Трехвалковый калибр образован тремя валками-дисками, оси которых размещены в одной плоскости так, что образуют равносторонний треугольник (см. рис. 4.9). Если рабочая поверхность дисков цилиндрическая, то трехвалковый калибр является треугольным (см. рис. 4.9); другие варианты трехвалкового калибра – образуемые ручьевыми дисками шестигранник и круг (см. рис. 4.10).

В зависимости от оформления треугольных калибров в них возможна прокатка, например, по схемам: «круг – треугольник», «треугольник – треугольник», «треугольник – шестигранник», «треугольник – круг» (см. рис. 4.11).

Четырехвалковый калибр образован четырьмя валками-дисками, оси которых размещены в одной плоскости «крестом» (см. рис. 4.12). Варианты четырехвалковых калибров: квадрат, восьмиугольник, круг. Возможна прокатка, например, по схемам: «круг – квадрат», «квадрат – квадрат», «квадрат – восьмиугольник», «квадрат – круг».

Клетки с многовалковыми калибрами существенно расширяют возможности прокатчиков. Достоинства многовалковых калибров обусловлены тем, что при прокатке в таком калибре очаг деформации плотно охвачен валками. Эти достоинства таковы: высокая вытяжная способность, возможность прокатывать малопластичные сплавы, повышенная точность получаемого профиля.

Недостатки многовалковых клеток связаны с особенностями их конструкции: если валки-диски имеют небольшой диаметр, то возникают существенные трудности с организацией подвода к ним мощности двигателя (так в четырехвалковом варианте обычно не удается сделать все валки приводными); если же валкам-дискам придать большой диаметр, то будет уменьшена вытяжная способность калибра и существенно снижена

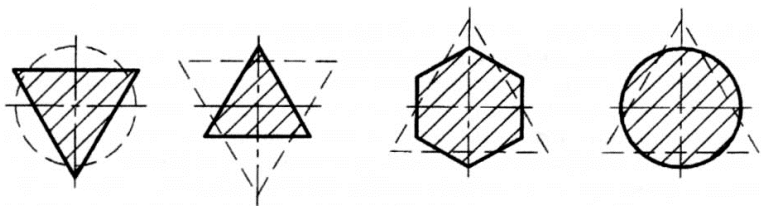


Рис. 4.11

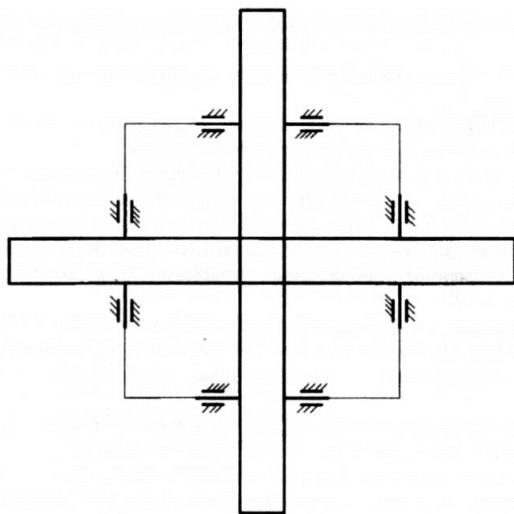


Рис. 4.12

прочность валков. Основной же недостаток состоит в том, что многовалковый калибр практически не поддается перенастройке.

С конца прошлого века многовалковые клетки применяются в основном в качестве калибрующих. Блоки из двух-трех таких клеток устанавливаются за чистовой клетью обычного сортового стана и служат для доводочной прокатки профиля, выходящего из последней клетки сортового стана. Обжатия в многовалковых клетях при этом невелики, т. к. их цель – доводка формы и размеров профиля. В качестве вытяжных многовалковые калибры получили пока что распространение лишь в производстве мелких кругов и катанки из алюминия и меди.

5. ГИБКИЕ СИСТЕМЫ КАЛИБРОВ ДЛЯ ПРОКАТКИ ШИРОКОГО СОРТАМЕНТА МЕДНЫХ ПРОФИЛЕЙ

5.1. Принципы выбора гибких систем калибров

В данном подразделе коротко рассмотрены общие принципы универсализации калибровок прокатных валков и приемы решения этой задачи посредством видоизменения (модификации) калибров и схем прокатки. Полезно ввести ряд терминов, позволяющих более компактно изложить последующие положения.

Различают следующие типы калибров:

- безручьевого (плоский) калибр, образованный участками гладких бочек валков;
- ручьевого калибр, образованный противолежащими ручьями оппозитных валков, например овальный;
- калибр, образованный противолежащими выступами оппозитных валков, например разрезной (разгонный);
- комбинированный калибр (сочетания типа гладкая бочка + ручей или выступ + ручей).

Различают также системы калибров: двоичная (например овал – круг); троичная (овал – ребровой овал – круг или пластовый шестиугольник – ребровой шестиугольник – квадрат); четверичная (овал – ребровой овал – овал – круг); пятиричная (квадрат – плоский калибр – ребровой овал – овал – круг); шестиричная (ящичный калибр – шестиугольник – ромб – квадрат – овал – круг); N -ичная (например совокупная система из N калибров всех клетей стана).

Система калибров является гибкой, если она позволяет получать не менее двух различных по размерам конечных профилей – товарных чистовых или профилей-полуфабрикатов.

Мини-система калибров – минимальная по числу калибров система, обеспечивающая заданное преобразование профиля. Например, двоичная система «овал – круг», обеспечивающая прокатку исходного круга в круг меньшего диаметра.

Гибкая мини-система калибров – минимальная по количественному составу совокупность калибров, обеспечивающая получение n различных по размеру чистовых профилей, где $n \geq 2$. Например, четверичная гибкая мини-система «овал – круг – овал – круг» позволяет получать два смежных по диаметру товарных круга из круглой исходной заготовки; четверичная система «плоский калибр – ребровой овал – овал – круг» при надлежащей настройке первых трех калибров позволяет получать в соответствующих чистовых калибрах не менее двух чистовых кругов смежных диаметров из квадратной или круглой исходной заготовки.

Ниже изложены общие принципы универсализации калибровки валков применительно к стану с двухвалковыми калибрами при прокатке по принципу «в каждом калибре – один проход».

Гибкая (универсальная) калибровка – это такая система калибров, которая позволяет получать различные конечные профили без перевалки валков; при этом варианты гибкого перехода с профиля на профиль таковы.

Вариант 1. Осуществляется перенастройка калибров гибкой мини-системы; например, мини-система «ромб – квадрат» позволяет прокатывать ряд более или менее четко оформленных чистовых квадратов. Диапазон регулирования по варианту 1 узкий, т. к. получаются профили лишь весьма близких размеров.

Вариант 2. В качестве чистового используется один из промежуточных калибров, а следующие за ним калибры выводятся из работы. Этот вариант применяется, когда калибровка представляет собой совокупность однотипных мини-систем калибров; например, многократно повторяющаяся мини-система «овал – круг» позволяет, заканчивая прокатку в любом из круглых калибров, получать в качестве конечных различные круглые профили.

Вариант 3. В качестве чистового используется вновь вводимый калибр, причем предшествующие калибры перестраиваются на измененный режим обжатий. Примером является мини-система «квадрат – плоский калибр (гладкая бочка) – ребровой овальный калибр – овал – круг» (см. рис. 4.8), позволяющая получать чистовые круги в широком диапазоне диаметров, а также аналогичная мини-система «квадрат – плоский калибр – слабо заполненный круг – плоский калибр – круг» (рис. 4.8). Частный случай этого варианта: при переходе с меньшего профиля на больший некоторые из предшествующих калибров выводятся из работы, и содержащие их клетки функционируют в транспортном режиме. Так, в рамках представленных на рис. 4.8 мини-систем при соответствующей замене чистового калибра можно использовать в качестве предчистового не только второй, но и третий с конца калибр при пропуске второго, или четвертый с конца при пропуске второго и третьего.

Современный опыт использования непрерывных и полунепрерывных станов в режиме многосортаментной прокатки позволяет сформулировать следующие требования к калибровкам прокатных валков таких станов.

1. В головной части стана при обжимной (черновой) прокатке желательно использовать системы калибров, сочетающие технологическую гибкость (т. е. максимальную универсальность) и высокую вытяжную способность с надежностью в работе.

2. Для всех проходов, включая чистовые, желательно обеспечивать возможность достаточно широкого регулирования степени заполнения калибров. Это требование является следствием обстоятельств, типичных для заводов ОЦМ, а именно: горячекатаные заготовки практически всегда подвергаются дальнейшей обработке волочением на готовые размеры, и поэтому целесообразно получать с использованием одного комплекта калибров ряд близких по размерам заготовок. Похожая ситуация возникает при прокатке профилей из черных металлов при использовании блока горячего калибрования, установленного за чистовой клетью стана.

3. Разработка калибровки для стана в целом должна быть подчинена принципу наибольшей ее гибкости и, в частности, отвечать следующим требованиям:

- простота изготовления и переточки калибров;
- простота и надежность валковой арматуры;
- простота перехода с профиля на профиль.

Этого можно достичь за счет использования для черновой и подготовительной прокатки калибров со слабо выраженными ручьями, а также калибров с низкой степенью заполнения. Например, полезны и перспективны следующие варианты повышения гибкости калибровок.

Широкое использование плоских калибров. Предельным случаем является RER-процесс, который применяется на ряде зарубежных станов и при котором все проходы, кроме одного-двух последних, проводятся только в плоских калибрах, т. е. на гладкой бочке (см. рис. 5.1, а). RER-процесс можно квалифицировать как полный отказ на стадии подготовительной прокатки от ручьевых калибров. Достигаемое при этом повышение гибкости связано с определенной платой – снижением частных обжатий и/или ужесточением требований по обеспечению устойчивости раската в ребровых проходах, что в условиях отечественных станов явилось препятствием к использованию RER-процесса.

Более приемлемым оказался частичный отказ от ручьевых калибров в варианте, согласно которому многократно используется мини-система «плоский калибр – круг» (рис. 5.1, б) и который освоен применительно к производству весьма широкого сортамента круглых и полосовых электротехнических профилей из медных сплавов.

Эксперименты и теоретический анализ показали, что в рамках подготовительной прокатки удачен вариант с многократным использованием сочетания калибров «ромб – плоский калибр» (рис. 5.1, в). В теоретическом аспекте этот вариант интересен тем, что заставляет различать понятия «система калибров» (ромб – плоский калибр) и реализуемая в этой системе «схема прокатки» (шестиугольник – шестигранник). В прикладном смысле вариант полезен тем, что позволяет получать шестигранный профиль, пригодный в качестве заготовки для волочения круглых профилей.

В отечественной практике примером нетрадиционных технологических решений может служить освоение полунепрерывного стана 250 (ПНС 250) Каменск-Уральского завода ОЦМ. Для соблюдения условий гибкого перехода при частой сменяемости профилей на этом стане были использованы схемы прокатки, включающие плющение заготовки в гладких валках, а именно:

- с использованием системы «гладкая бочка – ребровой калибр» разработана и внедрена технология прокатки прямоугольных и клиновидных

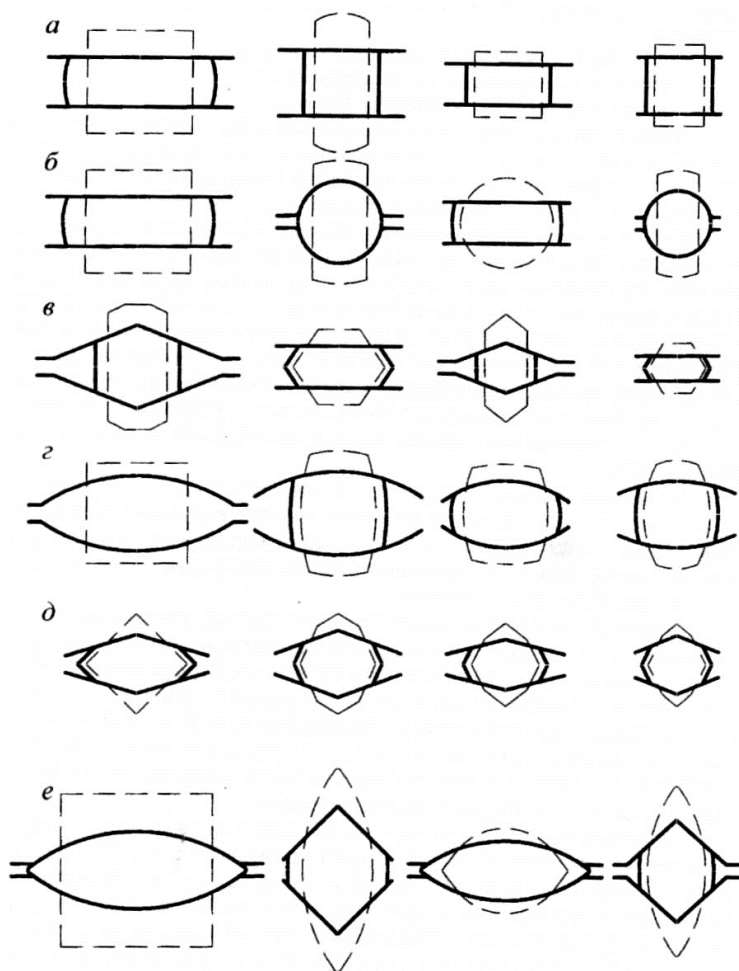


Рис. 5.1

полос шириной 50-125 мм, служащих заготовками для последующего волочения медных шин и меднокадмиевых коллекторных профилей;

- с использованием системы «гладкая бочка – круг» осуществлена прокатка в непрерывной группе 350 (НГ 350) круглых профилей диаметром 20-30 мм, служащих промежуточными заготовками для последующей прокатки в НГ 300, а также прокатка по той же системе в НГ 300 круглого профиля диаметром 14 мм, предназначенного для получения в НГ 250 медной катанки диаметром 8 мм;

- путем плющения круглых промежуточных заготовок в гладких валках НГ 300 были получены полосы шириной 30-50 мм.

Использование ручьевых калибров с низкой степенью заполнения. Одно из решений такого рода – использование для подготовительной прокатки системы «овал – овал» со степенью заполнения калибров около 65 % (см. рис. 5.1, г), т. е. в режиме, приближенном к RER-процессу. Овалы выполнены со сравнительно небольшими радиусами, а конфигурация свободной поверхности незаполненного овала такова, что раскат хорошо центрируется в следующем калибре и устойчив в нем.

Смежный вариант – прокатка в калибрах «ромб – ромб» с существенным незаполнением (рис. 5.1, д). Реализуемая схема прокатки: квадрат высокой степени заполнения (из ящичного или квадратного калибра) – неправильный восьмиугольник – восьмиугольник (при необходимости – правильный, т. е. восьмигранник). Правильный восьмигранник занимает промежуточное положение между квадратом и кругом, поэтому для получения аккуратного чистового квадрата или круга его можно прокатывать далее в калибрах систем «ромб – квадрат» или «овал – круг». Мелкие восьмигранники могут также служить заготовками для волочения квадратной или круглой проволоки.

В вариантах рис. 5.1, з и 5.1, д реализуется отказ от полного заполнения каждого из калибров в составе двоичной мини-системы. По аналогии с вариантом рис. 5.1, д отказ может быть лишь частичным, что приводит к нетрадиционным схемам, из которых наиболее перспективен вариант, показанный на рис. 5.1, е, – прокатка в калибрах «овал с высокой степенью заполнения – преднамеренно незаполненный квадрат с кантовкой его на 90°». Калибры с пониженной степенью заполнения можно конструировать с неглубоким врезом в валки.

Использование калибров с расширенными возможностями. Применение силовых проводок. В основе обеспечения гибкости лежит возможность перенастройки калибров с целью получить надлежащий предчистовой профиль. Однако способности к четкому оформлению при существенной перенастройке у открытых калибров весьма ограничены. Поэтому при решении задачи построения гибких калибровок представляют интерес следующие полуоткрытые (полузакрытые) и закрытые калибры, которые можно назвать раздвижными (см. рис. 5.2):

- раздвижной по ширине калибр для регулирования ширины группы полос (см. рис. 5.2, а);

- раздвижной по высоте калибр, позволяющий использовать прямоугольную, ромбическую или овальную заготовки (рис. 5.2, б);
- калибр, допускающий значительную перенастройку и по ширине, и по высоте, благодаря чему в нем можно прокатывать группу криволинейных клиновидных профилей, подлежащих последующей разгибке (рис. 5.2, в);
- специфический раздвижной калибр, образованный двумя конусными валками совместно с межвалковой силовой проводкой (рис. 5.2, г).

Плата за возможности, предоставляемые раздвижными калибрами, определяется необходимостью конструктивных решений по обеспечению широкой осевой регулировки валков (для раздвижных по ширине калибров), по предотвращению негативных последствий вследствие осевых усилий со стороны металла на валки и подшипники, а также необходимостью использовать силовые проводки, препятствующие закручиванию полосы относительно продольной оси. Преодоление этих трудностей открывает путь к широкому использованию раздвижных калибров, в т. ч. калибров с косым расположением в валках.

Особенностью косо расположенного калибра является тенденция к закручиванию полосы относительно оси, которое может использоваться для кантовки раската, выходящего из калибра. Такое сочетание прокатки с кантовкой расширяет функциональные возможности калибра, повышает гибкость калибровки, уменьшает затраты на валковую арматуру при переходе на другой профиль. В частности, эта идея реализована в варианте косо расположенного ребрового калибра для прокатки медных полос.

Использование силовых проводок соответствует тому фундаментальному принципу развития техники, согласно которому совершенствование устройства включает надделение его дополнительными функциями, т. е. повышает его гибкость. В рамках рассматриваемого направления получает развитие следующая линия: проводки направляющие – проводки силовые – проводки деформирующие. К примеру, известны межвалковые вводные проводки, выходящие за плоскость осей валков, а также проводковые системы, объединяющие вводные и выводные проводки. Такие проводки, выполняющие дополнительную функцию ограничения уширения, предложены применительно к RER-процессу; они могут также использоваться в случае слабо заполненных или неглубоко врезанных калибров, оставляющих достаточно места для размещения в межвалковом промежутке ограничителей уширения.

Возможна модификация калибров с созданием односторонне повышенного зазора для размещения массивной межвалковой проводки (см. рис. 5.2, г). При этом из круга получается профиль в виде трапеции с криволинейными основаниями, который далее прокатывается в овальном калибре по аналогии с вариантом «трапеция – овал» в первом проходе непрерывного стана в составе литейно-прокатного агрегата по одному из патентов США. Применительно к прокатке сортовых профилей перед

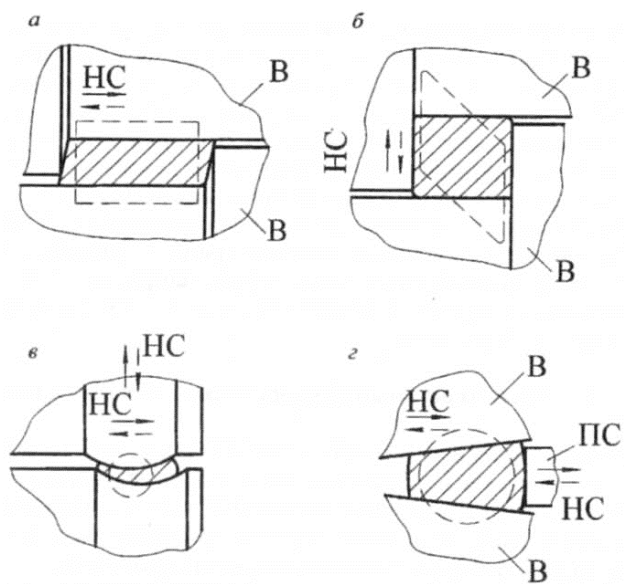


Рис. 5.2

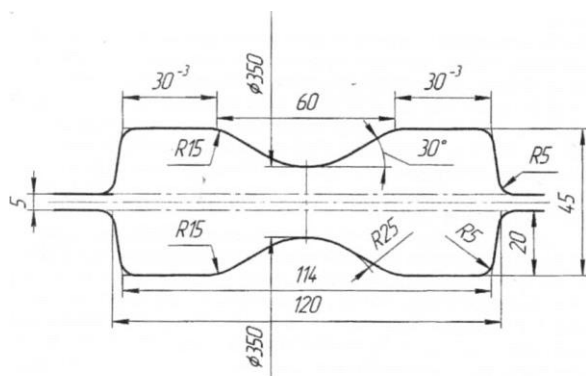


Рис. 5.3

некоторыми калибрами иногда устанавливают роликовые проводки, назначение которых – сглаживание острых углов проката. Основываясь на подобных технических решениях, можно утверждать, что одно из перспективных направлений повышения гибкости калибровки – вовлечение в процесс деформации валковой арматуры. Естественно, что проводки могут создавать лишь небольшую, корректирующую, деформацию, однако в деле обеспечения гибкости полезны все возможные нюансы. Так, упомянутое решение может быть реализовано для выглаживания кромок пластового шестиугольного профиля, получаемого в калибрах системы «ромб – плоский калибр» (см. рис. 5.1, в). Гибкость калибровки при этом резко возрастает, т. к. обеспечивается возможность получать заготовки под волочение не только кругов, но и полосок в широком сортаменте.

5.2. Особенности калибровки валков обжимной клетки

Калибровку валков обжимной клетки (ОК) для прокатки из слитков промежуточных заготовок, предназначенных для последующего получения в НГ заготовок: прямоугольных шин шириной 30–125 мм, клиновидных коллекторных полос такой же ширины, круглых профилей диаметром 8–40 мм, целесообразно разрабатывать с учетом следующих требований.

1. Калибровка должна быть в равной мере приемлема для использования слитков полунепрерывного и наполнительного литья разнообразных поперечных сечений - квадратных, трапециевидных, круглых, в т. ч. конических из меди и малолегированных медных сплавов.

2. Углы захвата не должны превышать 24–25° для меди и 20–21° для сплавов.

3. Во всех случаях из клетки должна выдаваться промежуточная заготовка с сечением, соответствующим сечению заготовок под волочение, получаемым из НГ стана; этому требованию отвечает сечение порядка 60х60 мм.

4. Для варианта прокатки на стане полос шириной 90–125 мм с ОК должна сниматься более крупная промежуточная заготовка сечением примерно 50х90 мм, из которой получают полосы шириной до 110–115 мм. Для прокатки еще более широких полос (до 120–125 мм) следует реализовать схему с использованием, например, разгонного калибра (см. рис. 5.3), расположенного на валках первой клетки НГ.

Таким образом, для обжимной клетки рекомендована реализованная на практике и проверенная в производстве схема прокатки (см. рис. 5.4), отвечающая требованию технологической гибкости. Вместе с тем для повышения универсальности калибровки ОК, расширения ее технологических возможностей и для получения более длинномерных бунтов полос и катанки, которые обеспечивают высокую производительность волочильного оборудования, может быть предложен иной вариант калибровки (см. рис. 5.5), имеющий, по сравнению с рассмотренным выше, ряд изложенных ниже существенных отличий.

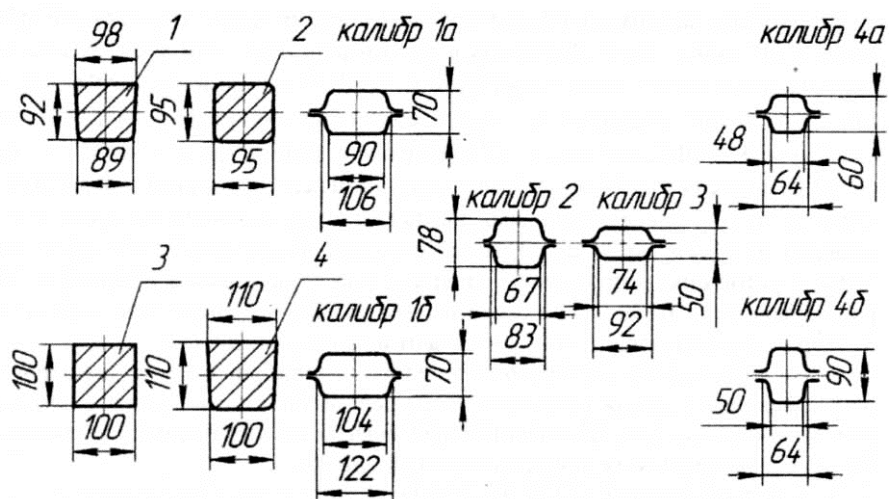


Рис. 5.4

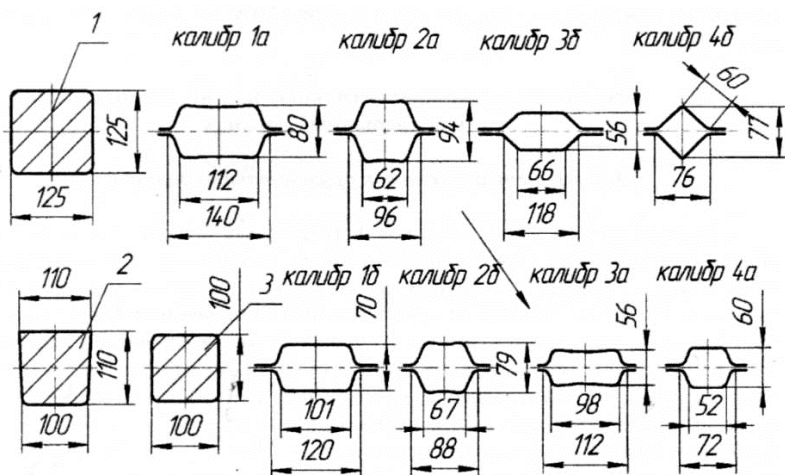


Рис. 5.5

1. Площадь максимального поперечного сечения медного слитка для прокатки в ОК может быть увеличена в 1,5–1,6 раза, при этом угол захвата на переточенных валках может достигать $\alpha = 27^\circ$. Приемлемость такого значения α может быть оправдана как многолетним опытом прокатки (в частности, в ОК трио 500 ПНС 250 завода «Камкабель», г. Пермь, где $\alpha = 31\text{--}32^\circ$, а также в ОК допсель-дуо 440 линейного стана Каменск-Уральского завода ОЦМ, где $\alpha \leq 26^\circ 40'$), так и сведениями исследователей, согласно которым α составляет от $24\text{--}25^\circ$ до $28\text{--}29^\circ$. Тем не менее для обеспечения стабильного захвата и устойчивого протекания процесса прокатки режимы обжатий в ОК рассчитывают в этом случае с учетом достаточного заземления металла в калибрах, соответственно чему назначают и выпуски калибров.

2. Во избежание возможного переполнения калибров (вследствие вероятных изменений условий прокатки) ручьи целесообразно выполнять с некоторой выпуклостью дна, обеспечивающей вогнутость обращенных в стороны больших граней раската после его кантовки на 90° .

3. С целью получить из ОК более точной по размерам промежуточной заготовки сечением примерно 60×60 мм в усовершенствованном варианте калибровки может быть предусмотрена дополнительная схема прокатки с участием мини-системы «шестиугольник – квадрат». С учетом реализации этого варианта в монтажную схему калибров должны быть внесены соответствующие изменения.

5.3. Режимы прокатки прямоугольных и клиновидных полос в непрерывных группах

5.3.1. Прокатка заготовок прямоугольных медных шин

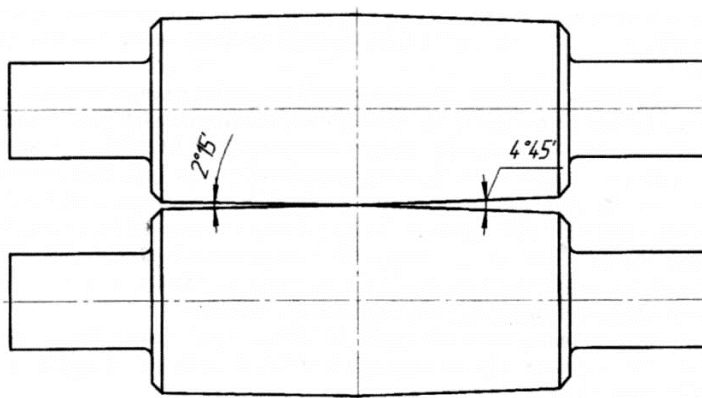
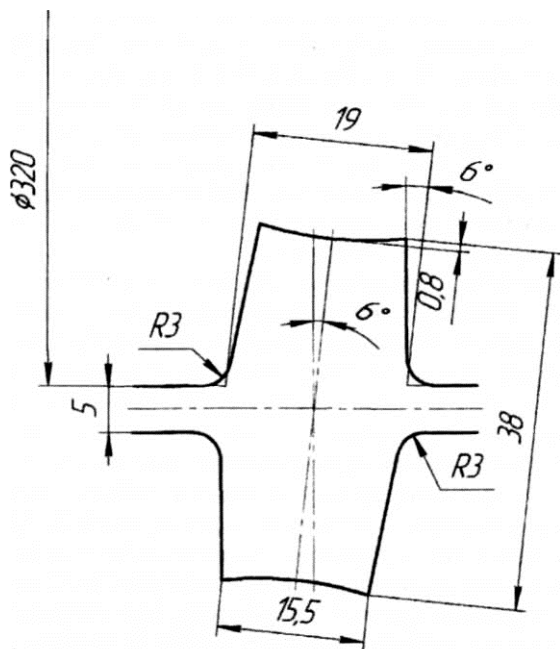
Мелкий сорт из медных сплавов получают, как правило, на специализированных линейных станах с использованием калибровок: для кругов системы «овал – квадрат» с овальным предчистовым и круглым чистовым калибрами; для полос системы из прямоугольных калибров или той же калибровки «овал – квадрат» в сочетании с гладкой бочкой и ребровыми калибрами. Применение таких систем для работающего в режиме частых переходов непрерывного стана нецелесообразно, поскольку требует значительного числа разных калибров и соответствующей валковой арматуры, трудоемкой их настройки при смене прокатываемого профиля. Поэтому при разработке калибровки валков для прокатки полос следует стремиться к созданию системы, которая бы позволяла быстро и без длительной настройки переходить с одной позиции сортамента на другую при небольшом числе комплектов валков и их компоновок и требовала бы минимума простой проводковой арматуры. Наиболее полно этим условиям удовлетворяет калибровка, основанная на сочетании прокатки на гладкой бочке и в ребровых калибрах. Оптимальный эффект такой калибровки достигается на станах, у которых горизонтальные клетки чередуются с вертикальными, – в таком случае процесс прокатки и валковая арматура предельно просты. При отсутствии в НГ вертикальных

клетей раскат после 2-3 проходов на гладкой бочке должен быть скантован в ребровое положение (например посредством валковых кантователей, имеющих в составе НГ) и прокатан в одном из ребровых калибров. Далее следует кантовка в пластовое положение высокой полосы, которая прокатана в ребровом калибре, служащем одновременно кантующим (см. рис. 5.6). В этих условиях схема «гладкая бочка – ребровой калибр – гладкая бочка» предпочтительней других вариантов. Всё вышесказанное относится к так называемым широким полосам ($b = 60\text{--}125\text{ мм}$), прокатка и уборка которых проводится в отрезках, т. е. поштучно.

При разработке технологии прокатки заготовок узких шин ($b = 30\text{--}60\text{ мм}$), для получения которых необходимо использовать еще одну НГ, а уборку осуществлять бунтовым способом, целесообразно провести анализ сортамента полос мелких сечений с позиции экономической целесообразности их изготовления на непрерывном стане. Если годовой выпуск (после суммирования объемов близких по размерам полос) составит, например, не менее 30-40 тонн, принять положительное решение. В этой ситуации при стремлении к максимальному использованию гибкой технологии прокатки, основанной на плющении полученных в предыдущей НГ круглых заготовок в гладких валках, и при применении нарезанных на валках ребровых калибров с возможностью их регулировки по высоте до 10-12 мм, возможно и используется следующий прием. С целью упростить кантовку полос из ребрового положения в пластовое ребровой калибр целесообразно наделить дополнительной функцией кантующего, для чего следует предусмотреть наклон его большой оси к вертикали под определенным углом порядка 6-8° (см. рис. 5.6) – в зависимости от межклетевого расстояния, в котором должна осуществляться кантовка. Дно ручьев ребровых калибров следует выполнять выпуклым, чтобы чистовой горячекатаный профиль имел плоские боковые грани.

Прокатка производственных партий заготовок медных шин на ПНС 250 с плющением на полосы в НГ 300 круглых заготовок из НГ 350 показала, что наклонный ребровой калибр надежно кантует раскат из ребрового положения в пластовое. Вместе с тем промышленный выпуск на ПНС 250 заготовок узких медных шин даже с применением ребровых калибров, нарезанных на валках клеток НГ 300, показал, что отсутствие на стане САРН приводит к нестабильному скоростному режиму НГ и повышенной разноширинности, порождаемой неконтролируемым межклетевым натяжением. Его негативное влияние компенсировали с помощью следующих мер.

1. Ужесточили режим обжатий в НГ 350, и в ребровые калибры клетки 2 – 300 стали поступать более высокие полосы, повысились коэффициенты их ребрового обжатия.



3. Предпоследнюю в НГ 300 клеть 3 – 300 перевели на работу в транспортном режиме, вследствие чего более чем в 1,5 раза увеличили длину рас-

ката между чистой клетью 4 – 300 и предчистой 2 – 300, тем самым создана предпосылка для прокатки с образованием петли.

Дополнительно был внесен еще ряд технологических и технических усовершенствований, касающихся проводковой арматуры и системы управления скоростным режимом стана, что позволило производить весь сортмент заготовок медных шин шириной 24–57 мм по технологической схеме, предусматривающей плющение круглых заготовок и использование ребровых калибров. Такая схема в полной мере отвечает требованию технологической гибкости.

5.3.2. Прокатка заготовок клиновидных коллекторных полос

При формировании клина из заготовки прямоугольного сечения неравномерность деформации по ширине порождает стремление заготовки к поперечному смещению в сторону толстой кромки и серповидность полосы из-за преобладания вытяжки по тонкой кромке. Поэтому формирование за один проход из заготовки прямоугольного сечения клиновидной полосы без серповидности или волнистости практически неосуществимо, а передача такой дефектной полосы на значительное расстояние к ножницам, моталкам и транспортерам сильно затруднена.

Оптимальным с позиции обеспечения качества проката и гибкости технологии, снижения трудоемкости при перевалках и переточках валков является вариант технологической схемы, при котором формирование клиновидного профиля проводится в трех последних клетях НГ, оборудованных жесткими (по существу силовыми) направляющими проводками, предотвращающими поперечное смещение и серповидность раската. В подготовительной и предчистой (третьей и второй клетях с конца НГ) относительно толстая ($b/h \approx 5-6$) и достаточно горячая прямоугольная полоса прокатывается на клин с большим обжатием, смягчающим влияние неравномерности деформации по ширине. Поэтому согласно опытным и теоретическим данным коэффициенты вытяжки в этих клетях рекомендуется выдерживать на уровне $\lambda = 1,5-1,8$, причем повышенные значения λ относятся к увеличенным углам формируемого профиля. Умеренное форсирование режима обжатий в этих проходах удачно сочетается с определенным уровнем технологической гибкости, а именно: снижено число комплектов специализированных валков, предназначенных для получения собственно клиновидной заготовки; процесс прокатки приближен к выполнению условий одновременного захвата полосы по всей ширине и ровного выхода ее из валков; подавлена тенденция к серпению полосы и уменьшено вследствие этого ее давление на выводные проводки. Для всех промежуточных близких по углу клиновидности профилей в подготовительной и предчистой клетях используется по одному комплекту валков, на которых нарезаны калибры с фиксированными углами; при этом общее число размещенных на валках калибров зависит от ширины получаемых полос и длины бочки валка.

В чистовой клети, коэффициент вытяжки в которой должен составлять 1,2 – 1,4, прокатку проводят в двухконусных валках с фиксированными углами (см.рис.5.7), охватывающими весь диапазон наклонов и толщин клиновидных заготовок.

Окончательно технологическая схема производства заготовок медно-кадмиевых коллекторных полос шириной 80-105 мм выглядит следующим образом:

- прессование круглых литых заготовок на горизонтальном гидравлическом прессе на заготовку квадратного сечения 95х95 мм;⁵
- прокатка этой заготовки в ОК на промежуточную заготовку прямоугольного сечения примерно 50х90 мм;
- раскатка полосы в пяти клетях НГ на гладкой бочке и в ребровых калибрах до необходимых размеров полос прямоугольного сечения;
- формирование в подготовительной и предчистой клетях клиновидного подката;
- окончательная (чистовая) прокатка клиновидных заготовок для последующего волочения из них коллекторных полос.

5.4. Калибровка валков для прокатки круглых профилей

Для реализации общего принципа гибкости технологии при прокатке разнообразного сортамента на непрерывном стане в данном случае целесообразно использовать систему «круг – гладкая бочка – круг». Опыты при прокатке свинцовых образцов, проведенные на лабораторном стане 200, и по прокатке титановых прутков на промышленном стане 450, а также промышленная прокатка в режиме плющения стальных круглых слитков на обжимном стане показали, что эта калибровка вполне работоспособна и вполне может быть применена в промышленных условиях. При прокатке заготовки круглого сечения в гладких валках поперечное сечение раската оказывается по форме близким к профилю, получаемому из плоскоовального калибра, и его последующая прокатка в круглом калибре проходит устойчиво. Основные преимущества системы «круг – гладкая бочка – круг» перед другими калибровками для получения кругов предопределяется высоким уровнем ее технологической гибкости, а именно:

- простотой изготовления и настройки валков и валковой арматуры;
- повышением стойкости валков и упрощением их изготовления, поскольку за счет поперечного перемещения клетей достигается широкое использование участков валков с гладкой бочкой;
- универсальностью, гибкостью системы, т. е. с ее помощью можно без перевалок прокатать на одном комплекте валков весь сортament промежуточных кругов.

Производство промышленных партий металла показывает, что наиболее стабильно процесс прокатки, особенно при получении медной катанки

⁵ Операция прессования медно-кадмиевого слитка предусмотрена вследствие крайне низкой пластичности сплава в литом состоянии, не допускающей его горячую прокатку без разрушения.

требуемой точности, проходит при использовании в чистой (проволочной) НГ системы калибров «овал – ребровой овал – овал – круг», известной тем, что она обеспечивает плавное изменение формы сечений полос по проходам при высоком качестве поверхности проката, устойчивость раскатов в калибрах, повышенную точность готовой катанки, пониженный износ валков. Важным обстоятельством является то, что при данном варианте удастся сократить число работающих клетей проволочной группы (например, вместо шести использовать четыре) и за счет этого значительно увеличить межклетевой промежуток, используя его для создания петли металла, крайне необходимой при отсутствии на стане САРН.

В качестве альтернативного может быть применен также вариант калибровки с повышенной вытяжной способностью. Эта система должна содержать калибры, существенно ограничивающие уширение, чтобы обеспечить стабильность ширины формой самих калибров при отсутствии на стане САРН, например: системы «овал – квадрат», «шестиугольник – квадрат», «ромб – квадрат». Однако такой вариант интенсивной калибровки вступает в противоречие с принципом универсальности калибровки по стану в целом, ориентированной на технологическую гибкость, поскольку достоинства варианта ограничиваются лишь рамками производства катанки.

В процессе освоения промышленного производства медной катанки диаметром $8^{+0,3}_{-0,4}$ мм на ПНС 250 были выявлены дефекты, причинами появления которых являлись: невысокое качество промежуточных круглых полос диаметром 40; 30 и 22,5 мм в НГ 350 и диаметром 17 и 14 мм в НГ 300; отсутствие САРН и средств регулирования работы двигателей; просчеты, допущенные при проектировании, изготовлении и монтаже вспомогательных устройств стана; нестабильность уширения вследствие изменений условий контактного трения по причине образования толстого слоя окалины на слитках, длительно пребывающих в печи из-за перерывов процесса прокатки при застревании раската, остановках и настройках.

Для устранения перечисленных недостатков были приняты следующие меры:

- перешли от питания через ртутные преобразователи на тиристорное управление работой всех электроприводов рабочих клетей;
- внедрили тонкую регулировку скоростных режимов приводов;
- модернизировали вспомогательные механизмы и устройства стана;
- провели ревизию всех проводящих устройств и валковой арматуры;
- в НГ 250 использовали систему калибров «овал – ребровой овал – овал – круг», которая, кроме отмеченных выше достоинств, за счет увеличенного межклетевого промежутка позволила вести прокатку с образованием петли металла и тем самым избавиться от неконтролируемого натяжения.

Реализация прокатки по уточненной технологической схеме, включающей интенсивный режим обжатий в НГ 350 и 300 и смягченный – в НГ 250, с получением катанки, полностью удовлетворяющей требованиям нормативного документа, подтвердила работоспособность технологии, которая обеспечивает, сочетание высокого качества продукции и технологической

гибкости. Калибровка валков с широким использованием системы «круг – гладкая бочка – круг» представляется вполне уместной для стана, ориентированного на производство не только катанки, но и других профилей в широком сортаменте. Таким образом, несмотря на противоречивость категорий «гибкость» и «производительность», при использовании современных приемов обеспечения работы стана в режиме гибкой переналаживаемой системы достигнуты приемлемые технико-экономические показатели.

6. ПРИНЦИПЫ ВЫБОРА РЕЖИМА ПРОФИЛЬНОЙ ПРОКАТКИ

6.1. Общие положения выбора режима обжатий (вытяжек)

Заданный товарный профиль из исходной заготовки можно получить, применяя разные системы калибров и, значит, различное число проходов. Однако свобода выбора у технолога-калибровщика не очень велика – он существенно стеснен общими требованиями, которые предъявляются к калибровке: высокая производительность прокатного стана при полном соответствии проката действующим стандартам, высокий выход годного, экономичность технологического процесса в целом.

В соответствии с фундаментальным положением о том, что любая экономия сводится в конечном счете к экономии времени, на передний план выходит задача обеспечения высокой производительности при соблюдении всех прочих требований.

Производительность прокатного стана в значительной мере определяется величинами обжатий и вытяжек в отдельных проходах. Чем выше обжатия (вытяжки), тем меньшее число проходов требуется для получения товарного профиля и тем больше производительность. Этим определяется стремление прокатчиков работать с возможно большими обжатиями (вытяжками). Однако величины обжатий (вытяжек) ограничивают многочисленные факторы:

- прочность валков и других деталей каждой рабочей клетки стана и линии привода;
- мощность и перегрузочная способность привода;
- угол захвата металла валками в каждом отдельном проходе;
- устойчивость полосы в каждом отдельном проходе;
- пластичность прокатываемого металла;
- качество и точность товарного профиля.

Производительность должна быть высока в широком понимании этого слова – не только при прокатке отдельно взятого товарного профиля, но и всех профилей из сортамента стана в их совокупности при минимальных затратах времени на переходы (перевалки и перенастройки) с профиля на профиль. Это требование является существенным в условиях малотоннажной прокатки, осуществляемой на заводах цветметобработки и заводах качественных сталей. Конкретизацией этого требования является положение о необходимости стремиться к гибкости технологического процесса прокатки.

Многочисленность требований к режиму обжатий (вытяжек) заставляет осуществлять его по методу последовательных приближений. Можно выделить в нем две основные стадии:

- предварительный (прикидочный) выбор на основании опыта работы данного конкретного стана и подобных ему;
- уточнение (корректировка) приближенного выбора с использованием рекомендаций, даваемых теорией профильной прокатки для каждого отдельного прохода.

6.2. Общая, частные и средняя вытяжки при профильной прокатке

Общей называется вытяжка, обеспечиваемая при прокатке исходной заготовки на конечный (товарный) профиль:

$$\lambda_{\text{общ}} = \omega_{\text{нач}} / \omega_{\text{кон}},$$

где $\omega_{\text{нач}}$ и $\omega_{\text{кон}}$ – площади поперечного сечения заготовки и профиля соответственно.

Частной называется вытяжка в отдельном проходе

$$\lambda = \omega_0 / \omega_1,$$

где ω_0 и ω_1 – площади поперечного сечения полосы до и после прохода.

Конкретизируем обозначение вытяжки с учетом номера прохода i ($i = 1, 2, \dots, N$):

$$\lambda_i = \omega_0^{(i)} / \omega_1^{(i)},$$

при этом

$$\begin{aligned} \lambda_1 &= \omega_0^{(1)} / \omega_1^{(1)} = \omega_{\text{нач}} / \omega_1^{(1)}, \quad \lambda_2 = \omega_0^{(2)} / \omega_1^{(2)} = \omega_1^{(1)} / \omega_1^{(2)}, \\ \dots \lambda_{N-1} &= \omega_0^{(N-1)} / \omega_1^{(N-1)} = \omega_1^{(N-2)} / \omega_1^{(N-1)}, \\ \lambda_N &= \omega_0^{(N)} / \omega_1^{(N)} = \omega_1^{(N-1)} / \omega_{\text{кон}}. \end{aligned}$$

Легко видеть, что

$$\lambda_{\text{общ}} = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_N = \prod_{i=1}^N \lambda_i.$$

Средней называют такую вытяжку λ_c , которая, будучи реализована в каждом отдельном проходе, приводила бы за N проходов к тому же значению $\lambda_{\text{общ}}$, что и частные вытяжки. Такое понимание средней вытяжки приводит к формуле

$$\lambda_{\text{общ}} = \underbrace{\lambda_c \lambda_c \dots \lambda_c}_{N \text{ раз}} = \lambda_c^N$$

Тогда

$$\lambda_c = \sqrt[N]{\lambda_{\text{общ}}} = \sqrt[N]{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_N}$$

т. е. средняя вытяжка есть *среднее геометрическое* из частных вытяжек.

Значения λ_c для различных станов известны из заводского опыта. Пример эмпирических данных представлен ниже.

Станы	λ_c
Крупносортовые.....	1,28...1,32
Среднесортовые	1,30...1,33
Мелкосортовые.....	1,32...1,35
Проволочные.....	1,38...1,39

В грубом приближении можно считать

$$\lambda_c = \exp \left[\frac{D_{\text{кон}}}{3(D_{\text{кон}} + \sqrt{\omega_{\text{кон}}})} \right],$$

где $D_{\text{кон}}$ – диаметр валков чистовой клетки; $\omega_{\text{кон}}$ – площадь поперечного сечения чистового профиля.

Приступая к работе над калибровкой валков для прокатки на данном стане нового профиля, можно приближенно оценить ожидаемое число проходов по формуле

$$N = \ln \lambda_{\text{общ}} / \ln \lambda_c$$

6.3. Распределение вытяжек по проходам с использованием эмпирических данных по конкретному стану

Пусть общая вытяжка за N проходов составляет

$$\lambda_{\Sigma} = \omega_{\text{нач}} / \omega_{\text{кон}} = \omega_0^{(0)} / \omega_1^{(N)},$$

где $\omega_{\text{нач}} = \omega_0^{(0)}$ – начальная площадь поперечного сечения полосы перед первым проходом; $\omega_{\text{кон}} = \omega_1^{(N)}$ – конечная площадь поперечного сечения полосы после N -го прохода.

Ведем величину

$$\Lambda_i = \ln \lambda_{\Sigma i} / \ln \lambda_{\Sigma}, \quad i = 1, \text{ или } 2, \dots, \text{ или } N,$$

где $\lambda_{\Sigma i}$ – общая вытяжка за i проходов; очевидно, что $\Lambda_i < 1$ при $i < N$, $\Lambda_i = 1$ при $i = N$.

Распределение вытяжек по проходам может быть задано указанием конкретного выражения величины Λ_i в зависимости от номера прохода i . Простейшая формула здесь такова

$$\Lambda_i = \frac{i/N + a_1 (i/N)^2 - a_2 (i/N)^3}{1 + a_1 - a_2}$$

где a_1 и a_2 – неотрицательные числовые параметры, определяемые особенностями прокатки на стане; значения a_1 и a_2 устанавливаются эмпирически по данным о реальном режиме прокатки конкретного профиля на конкретном стане.

Если $a_1 = a_2 = 0$, то

$$\Lambda_i = i/N,$$

так что

$$\ln \lambda_{\Sigma i} = i \ln \lambda_{\Sigma} / N = i \ln \lambda_c$$

и, следовательно,

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_i = \dots = \lambda_N = \lambda_c$$

т. е. вытяжки распределены по проходам равномерно. Это сугубо идеализированный вариант. Обычно вытяжки распределены по проходам неравномерно.

Если $a_1 \neq 0$, $a_2 = 0$, то

$$\Lambda_i = \frac{1 + a_1 i/N}{1 + a_1} \frac{i}{N}.$$

Учитывая рекомендации И.Ш. Берина и Н.З. Днестровского, применительно к проволочным станам, на которых получают медную или алюминиевую катанку, можно считать, что $a_1 = 0,04N$. Тогда

$$\lambda_{\Sigma i} = \exp \left(\frac{1 + 0,04i}{1 + 0,04N} \cdot i \ln \lambda_c \right)$$

При этом

$$\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_i > \dots > \lambda_N$$

т. е. частные вытяжки снижаются по ходу прокатки.

Более общим вариантом является такой, когда $a_1 > 0$ и $a_2 > 0$; тогда с увеличением i вытяжки сначала возрастают, а затем снижаются; при этом

$$a_2 = \frac{1}{3} \frac{a_1}{i_*}$$

где i_* – номер прохода, в котором частная вытяжка максимальна

$$\Lambda_i = \frac{1 + a_1 i/N (1 - i/3i_*)}{1 + a_1 (1 - 1/3i_*)} \frac{i}{N}$$

Формула с конкретизированным значением параметра a_1 дает ориентировочное распределение вытяжек по проходам. При выборе нового режима обжатий это распределение уточняется с учетом конкретных ограничений, накладываемых условиями захвата, устойчивости и пр.

Обычно в первых проходах вытяжки лимитируются углом захвата металла валками, мощностью привода, прочностью деталей рабочей клетки и линии привода. В последних проходах, когда значение температуры металла существенно понижено, вытяжки могут лимитироваться повышенным давлением металла на валки, требуется учитывать необходимость обеспечения точных размеров конечного профиля. Во всех реальных проходах с повышенными вытяжками может проявиться ограничение по устойчивости полосы в калибре.

С точки зрения производительности прокатки на реверсивных и линейных станах желательно увеличивать вытяжки по ходу прокатки (стремясь к тому, чтобы $i_*=N$), что ведет к уменьшению машинного времени прокатки.

На непрерывные и последовательные станы эта рекомендация не распространяется, и здесь желательно стремиться к снижению неравномерности загрузки клеток по усилию и моменту прокатки.

6.4. Прочностные ограничения на режим обжатий

Ограничения по прочности деталей рабочей клетки и линии привода, накладываемые на обжатие за проход как ограничения на порождаемые этим обжатием усилие P и момент M прокатки

$$P \leq [P], \quad M \leq [M],$$

где $[P]$, $[M]$ – допустимые значения P и M .

Усилие прокатки

$$P = pF,$$

где p – среднее давление металла на валки; F – контактная площадь. В свою очередь,

$$p = k\sigma_s n_\sigma$$

где k – коэффициент Лоде: для узких полос $k = 1$, для широких $k = 1,155$; в обычных условиях профильной прокатки $k = 1,08$; σ_s – среднее по очагу деформации сопротивление металла деформации; n_σ – коэффициент напряженного состояния.

В инженерных расчетах можно полагать

$$n_\sigma = 1 + \frac{1}{6} \left(\sqrt{\frac{2F}{\omega_0 + \omega_1}} - \sqrt{\frac{\omega_0 + \omega_1}{2F}} \right)^2 n_f,$$

где ω_0 и ω_1 – начальная и конечная (для данного прохода) площади поперечного сечения полосы; n_f коэффициент формы калибра

$$n_f = \Pi_k / b_k.$$

Здесь Π_k – периметр контакта полосы с валками в плоскости выхода полосы из валков; b_k – ширина контакта в этой плоскости.

Применительно к степени заполнения калибра $\delta = 1$ значения k_f даны ниже по данным А.П. Чекмарева.

Калибр	k_f
Круглый.....	2,80
Однорядусный овальный с соотношением осей:	
1,5.....	2,55
2.....	2,30
3.....	2,18
Плоскоовальный.....	2,20...2,30
Квадратный.....	2,82
Ромбический с углом при вершине, град	
100.....	2,60
110.....	2,40
120.....	2,30

Момент прокатки

$$M = 2 \psi l P,$$

где l – длина очага деформации; ψ – коэффициент плеча равнодействующей давлений металла на валки,

$$\psi = \begin{cases} 1 - \frac{1}{2n_\sigma} & \text{при } F \leq (\omega_0 + \omega_1)/2 \\ \frac{\lambda + n_\sigma}{(\lambda + 1)(n_\sigma + 1)} & \text{при } F > (\omega_0 + \omega_1)/2 \end{cases}$$

Здесь λ – коэффициент вытяжки в рассматриваемом проходе.

Допустимые значения $[P]$ и $[M]$ устанавливаются посредством расчетов, методика которых рассматривается в курсе «Оборудование прокатных цехов». Надо иметь в виду, что значение $[P]$ должно исключать опасность разрушения валков из-за их изгиба под воздействием сосредоточенной силы P (см. рис. 6.1). Существует опасность, что изгибающий момент, порожденный усилием прокатки в данном калибре (например ромбическом), приведет к разрушению валка по соседнему, более глубоко врезанному (например квадратному) калибру.

Нередко в состав рабочей клетки вводят предохранительные элементы, которые разрушаются при усилии, близком к $[P]$, в частности, под нажимные винты устанавливают предохранительные стаканы. Аналогичным образом иногда водят предохранительные элементы в линию привода (муфты с пальцами, срезаемыми при перегрузке).

6.5. Ограничение по захвату полосы валками

Применительно к прокатке прямоугольной полосы в цилиндрических валках такое ограничение установлено в теории прокатки в виде

$$\alpha \leq \mu,$$

где α – угол захвата в радианах; μ – коэффициент трения в стадии заполнения металлом межвалкового промежутка; в этой стадии процесс идет в режиме отставания, и по всему контакту металла с валками реализуется скольжение. Угол α – центральный угол валка, ограниченный радиусами,

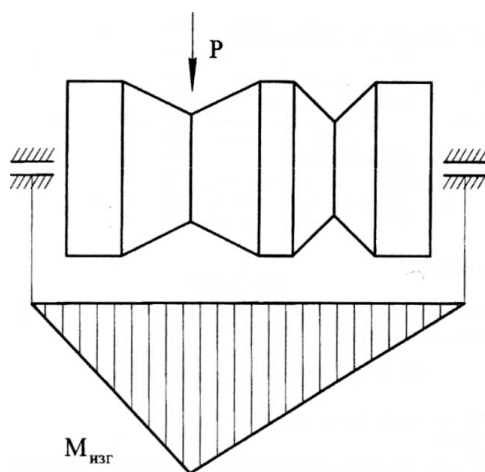


Рис. 6.1

один из которых совпадает с линией центров валков, а другой проходит через точку касания полосы и валка в момент начала захвата.

В прикладной формулировке условия захвата значение μ рассматривают как предельное допустимое значение угла захвата $[\alpha]$ и записывают это условие в виде

$$\alpha \leq [\alpha].$$

Из теории прокатки прямоугольной полосы в гладких валках известно, что

$$\alpha = \sqrt{\Delta h / R},$$

где Δh и R – абсолютное обжатие полосы и радиус валков.

Когда валки имеют различные радиусы R_B и R_H т. е. предусмотрено некоторое «давление» валков, тогда величина R определяется как среднее геометрическое из R_B и R_H :

$$R = \frac{2}{1/R_B + 1/R_H} = \frac{2R_B R_H}{R_B + R_H}.$$

При этом $R < (R_B + R_H)/2$ и α больше, чем в случае, когда каждый из валков имеет радиус $R = (R_B + R_H)/2$. Следовательно, при заданной сумме радиусов двух валков $R_B + R_H$ захватывающая способность валков снижается с увеличением разницы между R_B и R_H , т. е. с увеличением «давления» валков.

По мере износа прокатные валки время от времени подвергаются переточке, поэтому при определении α в формулировке ограничения по захвату следует брать минимальное значение R , которое будет после всех переточек.

В ситуациях, отличающихся от прокатки прямоугольной полосы в гладких валках (например, плющение круглой заготовки, прокатка в ручьевых калибрах), обжатие и/или радиус R переменны по ширине очага деформации и соответственно переменен угол захвата α в отдельных вертикально-продольных сечениях очага. В таком случае целесообразно использовать условие захвата в обобщенной формулировке

$$\alpha_* \leq [\alpha_*],$$

где

$$\alpha_* = \Delta\omega/F.$$

Здесь $\Delta\omega$ – площадь проекции контактной поверхности на плоскость осей валков; F – контактная площадь, т. е. площадь проекции контактной поверхности на плоскость прокатки – плоскость, которая перпендикулярна плоскости осей валков и одновременно параллельна этим осям; величина F определяется применительно к прокатке в валках после переточек.

Сортовики стремятся вести прокатку с повышенными обжатиями и поэтому применяют валки с грубоватой поверхностью (соответственно тому, что прокатка идет вгорячую, валки не шлифуют, не полируют), тем самым обеспечиваются повышенные значения μ и $[\alpha_*]$. При прокатке в калибрах «овал – квадрат» и «овал – круг» $[\alpha_*] = 0,35 \dots 0,38$; в ящичных калибрах и в калибрах «ромб – квадрат» $[\alpha_*] = 0,42 \dots 0,44$. При обжимной прокатке, где особенно важно повышение обжатий, идут на искусственное закругение рабочей поверхности валков: делают насечку или наварку; $[\alpha_*] = 0,52 \dots 0,56$.

Предельно возможный по трению угол захвата тем ниже, чем больше скорость скольжения валков относительно металла в момент касания полосы валками. Так, для захвата полосы плоским калибром (валками с гладкой бочкой) на блюминге в обычных условиях

$$[\alpha_*] = 0,21 + 0,24 e^{-\varphi(v)}, \quad \varphi(v) = 0,125 v^{1+0,25 v^2}$$

где значение $[\alpha_*]$ определяется в радианах; v , м/с² – окружная скорость валков.

6.6. Ограничение по устойчивости полосы в калибре

При выборе системы калибров и распределении обжатий по проходам полезно иметь в виду понятие «отпорность», которое введено в механике, где оно означает противодействие отклонениям по устойчивости положения.

Коротко остановимся на суженном понятии «геометрическая отпорность», которое относится к противодействующим факторам сугубо геометрического характера. Критерием геометрической отпорности является так называемая смещенная площадь $\Delta\omega$ – проекция площади контактной поверхно-

сти на плоскость осей валков. Чем меньше $\Delta\omega$, тем при прочих равных условиях выше геометрическая отпорность схемы прокатки. Целесообразно говорить по крайней мере о трех видах геометрической отпорности схемы прокатки: 1) отпорности поперечному смещению полосы; 2) отпорности повороту полосы относительно продольной оси; 3) отпорности кривой задаче полосы относительно линии прокатки.

Рассмотрим, например, геометрическую отпорность против так называемого «ромбления» при прокатке в гладких валках прямоугольной полосы с несколько искаженным (параллелограммным) сечением (см. рис. 6.2). Для простоты рассуждений уширением пренебрегаем. При заданных значениях начальной высоты h_0 , начальной ширины b_0 заготовки и заданном зазоре между валками h_1 величина смещенной площади $\Delta\omega$ одинакова при любом угле $\Delta\omega$ перекося полосы. Следовательно, прямоугольная полоса в гладких валках не обладает геометрической отпорностью против ромбления и вызываемого им поворота относительно продольной оси. Фиксация полосы в валках обеспечивается только «силовой» отпорностью, которая проявляется при очевидном (рис. 6.2) условии $\tan\varphi < \mu$, где μ – коэффициент трения. При прокатке в гладких валках без направляющих прямоугольная полоса не обладает также геометрической отпорностью против поперечного смещения относительно валков, т. к. при поперечном смещении значение $\Delta\omega$ остается тем же самым.

При прокатке овальной заготовки в круглом калибре нет геометрической отпорности против скручивания полосы.

При прокатке в калибрах системы «ромб – квадрат» минимальное значение $\Delta\omega$ имеет место при совпадении осей заготовки и калибра. Благодаря этому даже при неаккуратной задаче полосы в калибр происходит ее самоцентрирование.

Различные схемы прокатки обладают разной отпорностью и соответственно по-разному противодействуют склонности полосы к потере устойчивости в валках.

Опасность сваливания и скручивания раската в валках в значительной мере подавляется благодаря валковой арматуре – проводкам, которые не только направляют полосу, но и удерживают ее от сваливания и скручивания. Однако если тенденция к сваливанию и скручиванию велика, то потеря устойчивости становится возможной. Чтобы избежать потери устойчивости, требуется учитывать следующие рекомендации.

1. Калибры должны быть заполнены металлом аккуратно, а для этого должно быть правильно рассчитано формоизменение металла.

2. Валки должны быть как можно более точно настроены, валковая арматура должна быть в порядке.

3. В ребровых проходах отношение высоты заготовки к ее ширине не должно превышать предельно допустимых значений; эти значения найдены эмпирически и указаны в литературе⁶.

⁶ Смирнов Б. К., Шилов В. А., Инарович Ю. В. Калибровка прокаточных валков. М.: Металлургия, 1987. 324 с.

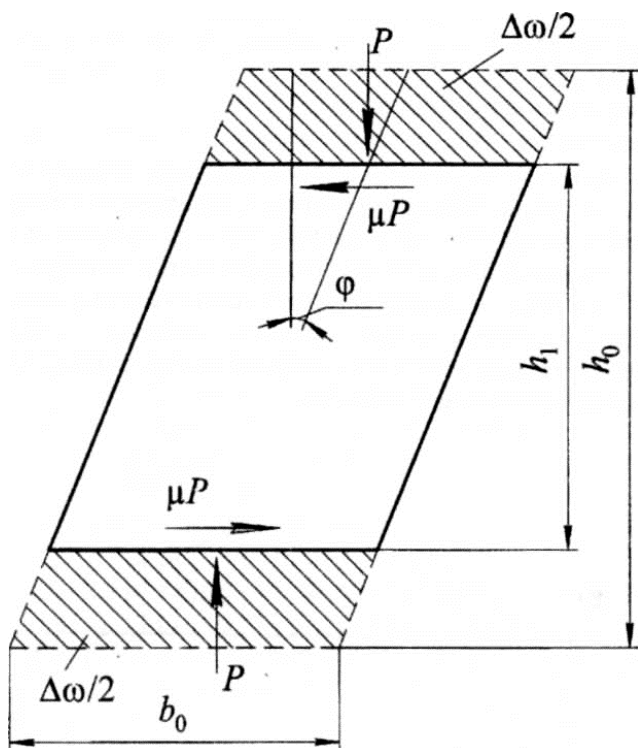


Рис. 6.2

6.7. Ограничение по пластичности прокатываемого металла

Существовала «предельческая теория» Кирхберга, утверждавшая, что прокатка с разовой вытяжкой более двух невозможна без нарушения сплошности металла. Затем В.Е. Грум-Гржимайло экспериментально показал, что при прокатке заготовки из малоуглеродистой стали, нагретой до высокой температуры, вполне возможно получить за проход десятикратную вытяжку.

И все же несмотря на то, что профильную прокатку ведут в горячую и пластичность металла соответственно повышена, существует опасность его разрушения в проходах с повышенными обжатиями. Условие отсутствия разрушения можно записать в виде

$$\Delta\omega/\omega_0 < \psi,$$

где $\Delta\omega$ – площадь проекции контактной поверхности на плоскость осей валков (истинная смещенная площадь); ω_0 – площадь поперечного сечения полосы до прохода; ψ – относительное сужение образца прокатываемого металла при испытании его на разрыв при той температуре ϑ которую имеют час-

тицы металла на свободных боковых поверхностях очага деформации в рассматриваемом проходе, поскольку именно в боковых зонах очага напряженное состояние близко к таковому при растяжении.

При прочих равных условиях величина $\Delta\omega$ и тем больше, чем больше уширение металла за проход. Значительное уширение характерно, например, для плющения круглой заготовки (см. рис. 6.3), и здесь соответственно повышена опасность разрушения полосы.

При прочих же равных условиях опасность разрушения тем выше, чем ниже θ , т. е. чем больше подстужены боковые зоны полосы и чем ярче выражены у раската ребра. Так при прокатке в калибрах системы «ромб – квадрат» уширение невелико, но у раската ярко выражены и соответственно сильно подстужены ребра, поэтому прокатку в этих калибрах удастся вести с большими обжатиями лишь при повышенных сечениях раската. Для средних и малых сечений система «ромб – квадрат» используется только в качестве чистовой, позволяющей получить товарный квадрат, тогда прокатка идет со сравнительно небольшими обжатиями.

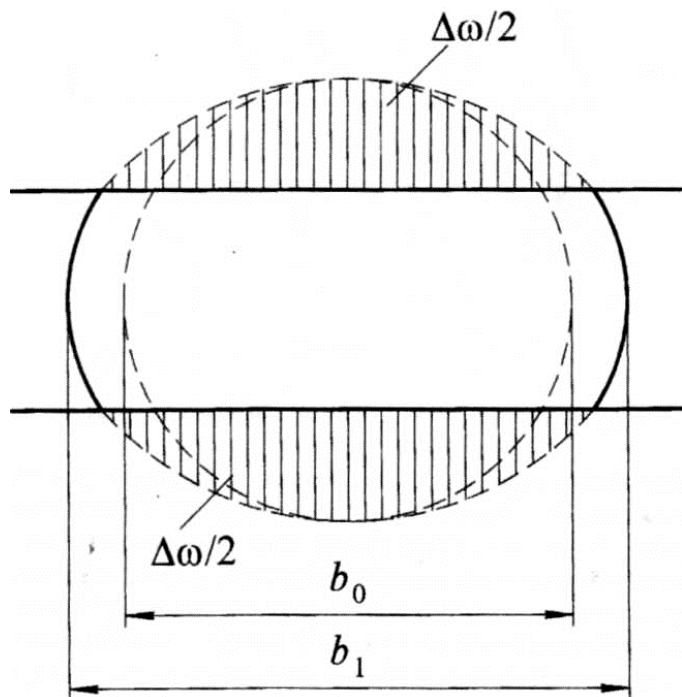


Рис. 6.3

6.8. Ограничения по износу калибров и точности товарного профиля

Чистовой калибр должен выполнять не столько функции прокатки, сколько функции калибрования (доводки профиля), поэтому вытяжка в чистовом калибре должна быть сравнительно небольшой (1,05...1,15). Вытяжка в предчистовом калибре также должна быть умеренной (1,15... 1,25).

6.9. Проверка соответствия между режимом обжатий и возможностями станového двигателя

Данная проверка выполняется так же, как и в условиях листовой прокатки, т. е. на основании нагрузочной диаграммы двигателя (диаграммы моментов на валу двигателя за период его работы). Особенностью ее является то, что профильную прокатку нередко ведут с перекрытием проходов, т. е. в некоторые интервалы времени прокатка идет одновременно в нескольких проходах. Это следует учитывать при построении нагрузочной диаграммы. Чтобы выявить интервалы прокатки с перекрытиями, строят график прокатки (график Адамецкого).

Различают два режима работы двигателя:

- длительный (из периода работы двигателя 60 % или более приходится на работу под нагрузкой);
- кратковременно-переменный (из периода работы двигателя 40 % или более приходится на работу на холостом ходу).

Если двигатель работает в длительном режиме, то должно выполняться условие

$$M_{\max} \leq M_{\text{ном}},$$

где M_{\max} – максимальный (пиковый) момент на валу двигателя; $M_{\text{ном}}$ – номинальный момент двигателя, указанный в его паспорте.

Это условие запрещает перегрузки двигателя при работе в длительном режиме. Если же двигатель работает в кратковременно-переменном режиме, то допускается его перегрузка, которая лимитируется условием

$$M_{\max} / M_{\text{ном}} \leq [k],$$

где $[k]$ – допустимый коэффициент перегрузки (дается в паспорте).

Если двигатель не перегружен свыше нормы, то при работе его в кратковременно-переменном режиме существует опасность, что он выйдет из строя из-за перегрева его обмотки. Во избежание такой опасности проводят проверку двигателя на нагрев. Конкретно требуется, чтобы было выполнено следующее условие

$$M_{\text{кв}} \leq M_{\text{ном}},$$

где

$$M_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n M_i^2 \cdot t_i}.$$

Здесь $M_{\text{кв}}$ – средний квадратичный момент на валу двигателя; M_i – момент двигателя в i -й характерный интервал времени его работы; t_i – длительность i -го характерного интервала; T – период работы двигателя, т. е. весь период прокатки.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ВВОДНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПРОФИЛЬНОЙ ПРОКАТКЕ	3
2. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РУЧЬЕВЫХ КАЛИБРОВ И ВАЛКОВ	15
3. ТИПОВЫЕ СХЕМЫ ПРОКАТКИ ПРОСТЫХ ПРОФИЛЕЙ	24
4. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О КАЛИБРОВКЕ ПРОКАТНЫХ ВАЛКОВ.....	45
5. ГИБКИЕ СИСТЕМЫ КАЛИБРОВ ДЛЯ ПРОКАТКИ ШИРОКОГО СОРТАМЕНТА МЕДНЫХ ПРОФИЛЕЙ.....	57
6. ПРИНЦИПЫ ВЫБОРА РЕЖИМА ПРОФИЛЬНОЙ ПРОКАТКИ.....	72

Учебное издание

Хайкин Борис Ефимович

Железняк Лев Моисеевич

ПРОФИЛЬНАЯ ПРОКАТКА

Редактор *И. В. Меркурьева*

Подписано в печать 14.10.2008

Бумага писчая

Уч.- изд.л. 5, 6

Плоская печать

Тираж 80 экз.

Формат 60x84 1/16

Усл. печ. л. 5,0

Заказ 684

Редакционно-издательский отдел УГТУ-УПИ
620002, Екатеринбург, ул.Мира, 19
rio@mail.ustu.ru

Ризография УГТУ-УПИ
620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19